

# ROBÔS QUADRÚPEDES: GERAÇÃO DE TRAJECTÓRIAS EM TEMPO REAL USANDO SISTEMAS DINÂMICOS NÃO- LINEARES

Pedro Tiago Peniche Torres



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2010



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de  
Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores

Candidato: Pedro Tiago Peniche Torres, Nº 1050397, 1050397@isep.ipp.pt

Orientação científica: Carla Manuela Alves Pinto, cap@isep.ipp.pt

Co-orientação científica: Cristina Manuela Peixoto dos Santos, cristina@dei.uminho.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

12 de Novembro de 2010



À Salete



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer aos meus pais, pelo esforço que fizeram e pelo apoio que me deram para que eu conseguisse concluir os estudos da melhor forma possível.

Agradeço também aos professores que me acompanharam ao longo do curso, em particular à professora Carla Pinto, por todo o tempo, trabalho e paciência que dedicou na orientação e coordenação desta Tese.

Por último, um agradecimento especial à Salete por todo o apoio e incentivo que me deu ao longo, não só da tese, mas de todo o curso, motivando-me a trabalhar mais e melhor.





## Resumo

A geração de trajectórias de robôs em tempo real é uma tarefa muito complexa, não existindo ainda um algoritmo que a permita resolver de forma eficaz. De facto, há controladores eficientes para trajectórias previamente definidas, todavia, a adaptação a variações imprevisíveis, como sendo terrenos irregulares ou obstáculos, constitui ainda um problema em aberto na geração de trajectórias em tempo real de robôs.

Neste trabalho apresentam-se modelos de geradores centrais de padrões de locomoção (CPGs), inspirados na biologia, que geram os ritmos locomotores num robô quadrúpede. Os CPGs são modelados matematicamente por sistemas acoplados de células (ou neurónios), sendo a dinâmica de cada célula dada por um sistema de equações diferenciais ordinárias não lineares. Assume-se que as trajectórias dos robôs são constituídas por esta parte rítmica e por uma parte discreta. A parte discreta pode ser embebida na parte rítmica, (a.1) como um *offset* ou (a.2) adicionada às expressões rítmicas, ou (b) pode ser calculada independentemente e adicionada exactamente antes do envio dos sinais para as articulações do robô. A parte discreta permite inserir no passo locomotor uma perturbação, que poderá estar associada à locomoção em terrenos irregulares ou à existência de obstáculos na trajectória do robô. Para se proceder á análise do sistema com parte discreta, será variado o parâmetro  $g$ . O parâmetro  $g$ , presente nas equações da parte discreta, representa o *offset* do sinal após a inclusão da parte discreta.

Revê-se a teoria de bifurcação e simetria que permite a classificação das soluções periódicas produzidas pelos modelos de CPGs com passos locomotores quadrúpedes. Nas simulações numéricas, usam-se as equações de Morris-Lecar e o oscilador de Hopf como modelos da dinâmica interna de cada célula para a parte rítmica. A parte discreta é modelada por um sistema inspirado no modelo VITE. Medem-se a amplitude e a frequência de dois passos locomotores para variação do parâmetro  $g$ , no intervalo  $[-5;5]$ . Consideram-se duas formas distintas de incluir a parte discreta na parte rítmica: (a) como um (a.1) *offset* ou (a.2) somada nas expressões que modelam a parte rítmica, e (b) somada ao sinal da parte rítmica antes de ser enviado às articulações do robô. No caso (a.1), considerando o oscilador de Hopf como dinâmica interna das células, verifica-se que a

amplitude e frequência se mantêm constantes para  $-5 < g < 5$ . No (a.2), usando novamente o oscilador de Hopf, a amplitude e a frequência têm o mesmo comportamento, crescendo e diminuindo nos intervalos de  $g$   $[-0.5, 0.34]$  e  $[0.4, 1.83]$ , sendo nos restantes valores de  $g$  nulas. Isto traduz-se em variações na extensão do movimento e na velocidade do robô, proporcionais à amplitude e à frequência, respectivamente. Ainda com o oscilador Hopf, no caso (b), a frequência mantém-se constante enquanto a amplitude diminui para  $g < 0.2$  e aumenta para  $g > 0.2$ . A extensão do movimento varia de forma directamente proporcional à amplitude. No caso das equações de Morris-Lecar, quando a componente discreta é embebida (a.2), a amplitude e a frequência aumentam e depois diminuem para  $-0.17 < g < 0.037$ . Quando se somam as duas componentes, mais uma vez a frequência mantém-se constante enquanto a amplitude diminui para  $g < 0.5$  e aumenta para  $g > 0.5$ .

Pode concluir-se que: (1) a melhor forma de inserção da parte discreta que menos perturbação insere no robô é a inserção como offset; (2) a inserção da parte discreta parece ser independente do sistema de equações diferenciais ordinárias que modelam a dinâmica interna de cada célula.

Como trabalho futuro, é importante prosseguir o estudo das diferentes formas de inserção da parte discreta na parte rítmica do movimento, para que se possa gerar uma locomoção quadrúpede, robusta, flexível, com objectivos, em terrenos irregulares, modelada por correcções discretas aos padrões rítmicos.

### ***Palavras-Chave***

Geração de trajectórias em tempo real, gerador central de padrões locomotores, parte rítmica, parte discreta, sistemas de equações diferenciais ordinárias não lineares, teoria da bifurcação, simetria.

## *Abstract*

Online generation of trajectories is a hard and complex task in robotics, still lacking a proficient solution. In fact, there are efficient controllers to previously defined trajectories; nevertheless, adaptation to unpredictable variables, such as irregular terrains, is a major problem for online controllers.

In this work, it is introduced a bio-inspired controller that generates locomotion patterns of a quadruped robot. It allows for gait switching, maintaining robots' stability. Non-linear systems of ordinary differential equations are used to generate the locomotion rhythms. These are called Central Pattern Generators (CPGs). Trajectories consist of both rhythmic and discrete parts. The rhythmic part is modelled by the Hopf oscillator or by Morris-Lecar equations. The discrete part is modelled by the VITE system.

The discrete part allows entering in quadruped locomotion disturbances, which may be associated to irregular terrain or the existence of obstacles in trajectory of the robot. To proceed to system analysis with discrete part, parameter  $g$  will be varied. The parameter  $g$ , present in the equations of the discrete part, represents the *offset* of the signal after inclusion of discrete part.

We review the bifurcation theory and symmetry techniques that allow us to classify the periodic solutions of the CPG models with locomotion quadruped rhythms. We simulate numerically the CPG models and compute the amplitude and the frequency of the periodic solutions, identified with two quadruped gaits, for varying  $g$  in interval  $[-5;5]$ . The discrete part is inserted into the rhythmic part as (a.1) an *offset*, (a.2) as part of the equations that generate the rhythmic part, (b) is summed. Using Hopf oscillator to model cell's dynamics, in case (a.1), we obtain that the frequency and amplitude of the periodic solution identified with the two gaits is held constant for  $-5 < g < 5$ . In case (a.2), using Hopf oscillator, we find that the amplitude and the frequency both increase and decrease for  $g \in [-0.5, 0.34]$  and  $g \in [0.4, 1.83]$ , and are zero for other values of  $g$ . This translates in varying range of motion and velocity, proportional to the amplitude and frequency respectively. In the case (b), the frequency is constant and the amplitude decreases for  $g < 0.2$  and increases for  $g > 0.2$ . The range of motion varies proportional to the amplitude. Using Morris-Lecar equations to

model cells' internal dynamics, in case (a.2), the amplitude and the frequency increase and then decrease in for  $0.17 < g < 0.037$ . In the case (b), the frequency remains constant and the amplitude decreases for  $g < 0.5$  and increases for  $g > 0.5$ .

We may conclude that: (1) the best way to insert the discrete part to cause less disturbance in the robot movement is the insertion as an *offset*; (2) the integration of discrete part seems to be independent of the systems of ordinary differential equations that model the internal dynamics of each cell.

As future work, it is important to pursue the study of different forms of insertion of discrete part in the rhythm part of the movement, so you can generate a robust, flexible and an objective quadruped locomotion, in irregular terrain modelled by discrete corrections to rhythmic patterns.

### ***Keywords***

Online generation of trajectories, central pattern generator, rhythmic part, discrete part, non linear systems of ordinary differential equations, bifurcation theory, symmetry.

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	4
1.2. OBJECTIVOS.....	5
1.3. CALENDARIZAÇÃO .....	6
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	6
<b>2. MODELO DE CPG PARA QUADRÚPEDES.....</b>	<b>9</b>
2.1. SIMETRIA DOS MODELOS.....	9
2.1.1. Rede da Figura 1 a) .....	9
2.1.2. Rede da Figura 1 b) .....	10
2.2. PASSOS LOCOMOTORES DOS QUADRÚPEDES.....	11
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PASSOS LOCOMOTORES.....	14
2.3.1. Modelo da Figura 1a).....	15
2.3.2. Modelo da Figura 1b).....	15
2.4. BIFURCAÇÃO DOS PASSOS PRIMÁRIOS.....	16
2.4.1. Rede da Figura 1 a) .....	16
2.4.2. Rede da Figura 1 b) .....	17
2.4.3. Explicação fisiológica das transições de passos locomotores .....	18
<b>3. SIMULAÇÕES DOS MODELOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. SISTEMA RÍTMICO.....	22
3.1.1. Oscilador de Hopf.....	22
3.1.2. Equações de Morris-Lecar.....	23
3.2. SISTEMA RÍTMICO E DISCRETO .....	26
3.2.1. Oscilador de Hopf.....	27
3.2.2. Equações de Morris-Lecar.....	33
3.3. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA.....	36
3.3.1. Simulação Webots™ .....	36

3.3.2.	<i>Implementação Real</i> .....	37
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>41</b>

## Índice de Figuras

Figura 1	Modelos de 4 células de um CPG de quadrúpedes. Acoplamento para os passos: a) <i>trot</i> , <i>pace</i> e <i>bound</i> e b) <i>walk</i> .	3
Figura 2	<i>Walk</i> [10].	11
Figura 3	<i>Trot</i> [10].	12
Figura 4	<i>Pace</i> [10].	12
Figura 5	<i>Bound</i> [10].	13
Figura 6	<i>Transverse Gallop</i> [10].	13
Figura 7	<i>Rotary Gallop</i> [10].	13
Figura 8	Relações de fase dos passos locomotores [26].	14
Figura 9	Diagrama de bifurcações dos passos locomotores da Figura 1a) [5].	17
Figura 10	Diagrama de bifurcações reduzido dos passos locomotores da Figura 1b).	18
Figura 11	Diagrama de transições conforme a velocidade do animal [18].	19
Figura 12	Passo locomotor <i>trot</i> , usando o sistema (4).	23
Figura 13	Passo locomotor <i>pace</i> , usando o sistema (4).	23
Figura 14	Passo locomotor <i>trot</i> , usando o sistema (5).	25
Figura 15	Passo locomotor <i>pace</i> , usando o sistema (5).	25
Figura 16	Passo locomotor secundário <i>transverse gallop</i> , obtido através do <i>trot</i> no sistema (5).	26
Figura 17	Componente discreta: a) embebida na parte rítmica (esquerda) e b) somada á parte rítmica (direita).	26
Figura 18	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>trot</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (8).	28
Figura 19	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>pace</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (8).	28
Figura 20	Solução periódica identificada com o <i>trot</i> , onde se pode verificar a inclusão da parte discreta na parte rítmica (a 1/3 da figura) e remoção da mesma (a 2/3 da figura) para $g=3,0$ .	29
Figura 21	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>trot</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (9) (gráfico rescalado de $[-5,5]$ para $[-0.5;2]$ ).	30
Figura 22	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>pace</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (9) (gráfico rescalado de $[-5,5]$ para $[-0.5;2]$ ).	30
Figura 23	Solução periódica identificada com o <i>trot</i> , onde se inclui (1/3 da figura) e remove (2/3 da figura) a parte discreta para $g=1,5$ .	31
Figura 24	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>trot</i> , para variação de $g$ , segundo Figura 17.b).	32
Figura 25	Solução periódica identificada com o <i>trot</i> , onde se inclui (1/3 da figura) e se remove (2/3 da figura) a parte discreta para $g=1,0$ .	32

Figura 26	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>trot</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (10) (gráfico rescalado de $[-5,5]$ para $[-0.01;0.081]$ ). ....	33
Figura 27	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>pace</i> , para variação de $g$ , usando o sistema (10) (gráfico rescalado de $[-5,5]$ para $[-0.17;0.037]$ ). ....	34
Figura 28	Solução periódica identificada com o <i>trot</i> , com inclusão (a 1/3 da figura) e remoção da parte discreta (a 2/3 da figura) para $g=1,0$ .....	34
Figura 29	Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo <i>trot</i> , para variação de $g$ , segundo Figura 17.b).....	35
Figura 30	Solução periódica identificada com o <i>trot</i> , para inclusão (a 1/3 da figura) e remoção (a 2/3 da figura) da parte discreta para $g=1,0$ . ....	36
Figura 31	Imagem retirada do vídeo do Webots™ ( <i>walk</i> ).....	37
Figura 32	Imagem retirada do vídeo da implementação real no Aibo ( <i>walk</i> ).....	38



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Passos Locomotores dos quadrúpedes segundo rede da Figura 1a) .....	15
Tabela 2	Passos secundários obtidos por quebra de simetria dos passos primários.....	16
Tabela 1	Passos Locomotores dos quadrúpedes segundo rede da Figura 1b).....	17



## *Acrónimos*

CPG – Gerador Central de Padrões (Locomotores)

ODE – Equação Diferencial Ordinária



# 1. INTRODUÇÃO

As formas de locomoção do reino animal são múltiplas e variadas. Cada espécie tem a sua forma característica de locomoção, podendo, no entanto, haver padrões semelhantes entre diferentes espécies. Por exemplo, os quadrúpedes e os bípedes têm um padrão de locomoção comum, que se caracteriza por saltar com todas as pernas simultaneamente.

Na robótica desenvolve-se pesquisa com o objectivo de construir robôs que sejam capazes de se locomoverem como os animais, de forma estável e adaptável às condições do terreno em que se movimentam, ou com o objectivo de desempenharem tarefas específicas [1][29][19][35][44][42].

Há robôs com lagartas, rodas e robôs com pernas [6][19][14] . Robôs com pernas têm vantagens de adaptabilidade ao terreno, quando comparados com os robôs com lagartas ou rodas [1].

A pesquisa na área dos robôs com pernas é um tema ainda em desenvolvimento, dado que, apesar dos resultados animadores, há questões fundamentais, que se prendem com o controlo das pernas, a coordenação entre as mesmas e o equilíbrio, que continuam a ser de difícil resolução. Assim, a geração de trajectórias de robôs com pernas em tempo real tem sido um desafio constante para os investigadores, desafio este que ainda não foi completamente ultrapassado.

Ultimamente, tendo como ponto de partida o que se passa na natureza em relação à locomoção animal, os investigadores têm vindo a propor um novo conceito, o gerador central de padrões de locomoção (CPG – do inglês “Central Pattern Generator”) [2].

Os biólogos assumem que a locomoção nos vertebrados é controlada por um gerador central de padrões de locomoção, situado na espinal medula, capaz de gerar sinais rítmicos complexos para o controlo de movimentos periódicos coordenados. Estes CPGs são activados por um simples sinal enviado pelo cérebro, no caso animal, ou pela camada lógica superior, no caso dos robôs [6].

Os investigadores têm utilizado os CPGs na modulação dos ritmos locomotores de diversos animais, desde invertebrados a vertebrados [14][23][9][40][9][13][41].

Os CPGs são modelados por sistemas dinâmicos acoplados. Estes sistemas dinâmicos possuem algumas propriedades interessantes que justificam a sua utilização como modelos de locomoção na robótica: controlo distribuído, capacidade de lidar com redundâncias, rápido controlo de malhas e rápida modelação da locomoção através do controlo de sinais.

Os modelos dos CPGs podem ser projectados sob diferentes níveis de abstracção, dependendo do fenómeno em estudo. Estes podem ser modelos biofísicos, connexionistas, sistemas abstractos de osciladores acoplados ou neuro-mecânicos.

O modelo biofísico é baseado em modelos de neurónios do tipo Hodgkin-Huxley [17]. Nestes, é investigada a geração de actividade rítmica num pequeno circuito neuronal. Em alguns casos são investigadas ao detalhe as propriedades de um único neurónio. Enquanto uns modelos se concentram nos detalhes da dinâmica de pequenos circuitos, outros centram-se na dinâmica de grandes populações de neurónios [9].

O modelo connexionista utiliza modelos de neurónios simplificados como o integrador permeável [40]. O objectivo deste modelo é o de conhecer como a actividade rítmica é gerada, através das propriedades da rede, e como circuitos oscilatórios neuronais diferentes são sincronizados via conexões inter-neurónios [35].

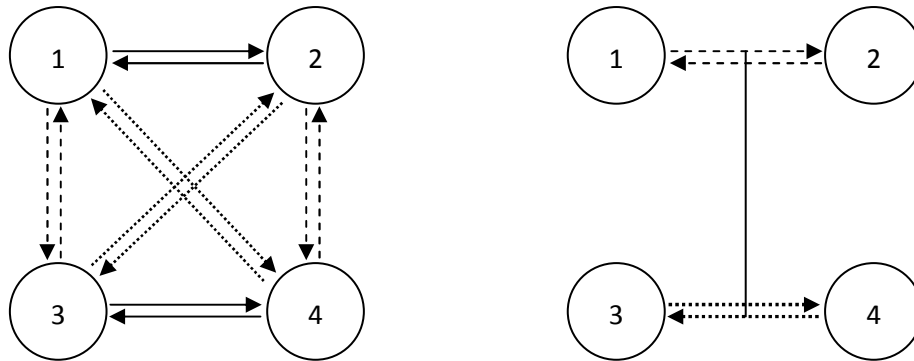
O modelo de osciladores acoplados consiste numa rede de sistemas de equações diferenciais ordinárias não lineares acopladas. Neste caso, os osciladores tanto podem representar a actividade de um centro oscilador completo ou um único neurónio. O objectivo deste modelo não é o estudo dos mecanismos de oscilação (pois é assumido que

estes existem) mas sim o estudo de como as ligações inter-osciladores e as diferenças de frequência internas afectam a sincronização e o desfasamento de uma população de osciladores. Os mecanismos de oscilação, estes, podem ter diferentes topologias, ou seja, podem ser modulados por diversos sistemas de equações diferenciais ordinárias [22].

Alguns dos osciladores mais utilizados são o oscilador de Hopf [6][22][1][29], o de Matsuoka [23][24], as equações de Morris Lecar [27], entre outros.

Nos modelos neuro-mecânicos, existem protótipos físicos, mecânicos de um corpo, um modelo biofísico. Estes possibilitam a simulação da interacção dos modelos propostos com o ambiente físico que os rodeiam, integrando um efeito de re-alimentação sensorial (visão, tacto, etc.) [20].

Neste trabalho estuda-se uma rede de quatro osciladores acoplados, que é um modelo de gerador central de padrões de locomoção quadrúpede. Existem dois grandes modelos de geradores centrais de padrões de locomoção para animais quadrúpedes, o modelo de 8 e o modelo de 4 células/osciladores. No modelo de 8 células é assumido que cada perna recebe o sinal de duas células. A interpretação fisiológica para este modelo é o facto das articulações dos animais serem controlados por dois tipos de músculos: flexores e extensores [9][13]. O modelo de 4 células é mais simplificado, assumindo que cada articulação de uma perna apenas recebe sinal de uma única célula (Figura 1) [6].



**Figura 1** Modelos de 4 células de um CPG de quadrúpedes. Acoplamento para os passos: a) *trot, pace e bound* e b) *walk*.

Neste trabalho estuda-se o modelo de 4 células, sendo a dinâmica de cada célula constituída por uma parte rítmica e uma parte discreta. Usam-se as equações de Morris-Lecar e o oscilador de Hopf como modelos de cada um dos quatro osciladores para a parte rítmica e um modelo inspirado no modelo VITE [6] para modelar a parte discreta.

Ritmicamente, o modelo de CPG de quatro células prevê quatro soluções periódicas, identificadas com quatro passos locomotores primários e dois passos secundários. Os passos primários são o *bound*, *trot*, *pace* e o *walk*. Os passos secundários são o *transverse gallop* e o *rotary gallop*. Variando a força do acoplamento entre os osciladores, consegue-se a transição de dois passos primários para dois passos secundários.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Tem-se observado, nas últimas décadas, uma grande evolução no estudo dos sistemas robóticos. Actualmente os robôs são utilizados nas mais diversas áreas, desde a área militar, aeronáutica, aeroespacial, entre outras [1][9][42]. São sobejamente conhecidos os braços robóticos, presentes nas grandes linhas de montagem das mais diversas indústrias de fabrico automóvel, por exemplo. Na medicina é agora frequente a utilização de robôs nas cirurgias [44] e a utilização de componentes robóticos em próteses [28]. Na indústria aeroespacial os robôs são usados para executar tarefas em ambientes hostis [31]. Na indústria farmacêutica, para além da utilização de robôs na produção dos medicamentos, é agora mais frequente a existência de farmácias inteligentes [35].

A modulação dos ritmos de locomoção é um tema de investigação de grande desenvolvimento na robótica. Várias técnicas têm vindo a ser utilizadas na modulação com o objectivo de se conseguir gerar trajectórias estáveis. Barai e Nonami [3] utilizam lógica difusa para modular matematicamente um controlador com dois graus de liberdade, para controlo da locomoção de um robô de seis pernas actuado hidraulicamente. Espenschied, Quinn, Beer e Chiel [8], utilizam uma rede de mecanismos distribuída para controlo do movimento de um robô insecto com seis pernas. Neste estudo, utilizam também reflexos locais aplicados nas pernas dos robôs para contornar obstáculos. Num outro artigo, Stoy, Shen e Will [37] utilizam uma técnica baseada num algoritmo do tipo mestre-escravo, para controlo da locomoção de um robô constituído por módulos, auto-reconfigurável. Segundo os autores, esta técnica garante uma robustez face a erros de comunicação e de configuração.

Righetti e Ijspeert [33] utilizam modelos de geradores centrais de padrões de locomoção, em particular os modelos de 4 células (Figura 1) para gerar os ritmos locomotores. Eles conseguem obter quatro passos de locomoção: *walk*, *trot*, *pace* e *bound*. Para isso



utilizaram dois modelos distintos de 4 células: um para as baixas velocidades (*walk*), e outro para velocidades mais elevadas (*trot*, *pace*, e *bound*). A diferença entre os modelos reside no tipo de acoplamento entre os 4 osciladores, que é representado por setas diferentes. Para a modulação da parte rítmica do CPG é utilizado o oscilador de Hopf. A escolha recaiu sobre este oscilador pois este possui um ciclo limite estável, e a sua forma é independente da escolha dos parâmetros da frequência. Para além disso, é possível controlar a frequência e a amplitude das fases ascendente e descendente. A maior contribuição deste trabalho foi a integração de uma componente de realimentação, com a qual se pode controlar o comportamento do sistema e alterar as suas propriedades, através da modificação de apenas alguns parâmetros.

Num outro trabalho, Degallier, Righetti, Natale, Nori, Metta e Ijspeert [6] apresentam o seu modelo de um robô que simula uma criança de 2 anos. Baseados no artigo referido anteriormente, [33], é utilizado mais uma vez o oscilador de Hopf (componente rítmica) com a componente de realimentação, no entanto, é também acrescentada uma nova componente do movimento, a componente discreta. Esta componente vai proporcionar uma alteração no sistema (amplitude e/ou frequência), fazendo com que este seja capaz de responder a alterações no ambiente, tais como obstáculos e terrenos irregulares.

## **1.2. OBJECTIVOS**

O objectivo deste trabalho é o de estudar as duas redes de células acopladas que são modelos de geradores de padrões de locomoção (CPGs) para animais quadrúpedes. Estes modelos são usados na geração de trajectórias em tempo real de robôs quadrúpedes. Na geração das trajectórias consideram-se a parte rítmica do movimento e uma parte discreta, que é usada para inserir perturbação no modelo. Os sinais produzidos pelo modelo são depois enviados para os controladores de cada articulação. Usam-se dois sistemas de equações diferenciais ordinárias distintas para simular a dinâmica interna de cada célula. Um dos sistemas de equações diferenciais é usado habitualmente na literatura em estudos de trajectórias de robôs em tempo real – oscilador de Hopf. O outro sistema de equações, as equações de Morris-Lecar, modela os sinais enviados pelos neurónios, *Motoneurons*, para os músculos das articulações dos animais, para que estes se locomovam. Este é um modelo mais realista do que o oscilador de Hopf, que é somente um modelo teórico.

### **1.3. CALENDARIZAÇÃO**

No início do trabalho, Outubro e Novembro de 2009, procedeu-se à recolha e estudo de literatura existente sobre geração de trajectórias de robôs.

Nos meses seguintes procedeu-se à implementação e simulação dos dois modelos de CPG em Matlab™, considerando-se como dinâmica interna o oscilador de Hopf e as equações de Morris-Lecar. Nas simulações distinguiu-se entre parte rítmica apenas e parte rítmica e discreta.

A partir de Julho de 2010 e até à data de entrega, foi elaborado este relatório do trabalho desenvolvido.

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema em estudo, abordando assuntos importantes para a compreensão deste trabalho. Faz-se também uma contextualização do tema dentro dos diversos estudos já realizados e uma descrição dos objectivos propostos para este trabalho, bem como a sua calendarização e organização.

No capítulo 2 estudam-se mais em profundidade os modelos da Figura 1. Na secção 2.1 estuda-se a simetria dos modelos. Na secção 2.2 é feita uma descrição dos principais passos locomotores dos animais quadrúpedes. A classificação destes passos, usando o Teorema H/K, faz-se na secção 2.3. Por último, na secção 2.4, analisa-se a bifurcação dos passos locomotores primários.

No capítulo 3 são apresentados os resultados das simulações das duas redes de células da Figura 1. Consideram-se, como dinâmica da parte rítmica de cada célula, o oscilador de Hopf e as equações de Morris-Lecar. As simulações distinguiram-se em dois tipos distintos: o primeiro refere-se apenas à parte rítmica, o segundo acrescenta à parte rítmica a parte discreta. Esta última é embebida na parte rítmica podendo ser (a.1) incluída como um *offset* ou (a.2) adicionada às equações que modelam a parte rítmica, ou (b) pode ser calculada independentemente e adicionada à parte rítmica exactamente antes do envio dos

sinais para as articulações do robô. Foram analisadas as respostas do sistema em amplitude e frequência para alterações do parâmetro  $g \in [-5;5]$ .

Por último, são apresentadas as conclusões retiradas da elaboração deste trabalho e as perspectivas de futuros desenvolvimentos do mesmo.



## 2. MODELO DE CPG PARA QUADRÚPEDES

Neste capítulo estuda-se mais em profundidade os modelos da Figura 1. Na secção 2.1 estuda-se a simetria dos modelos. No ponto 2.2 é feita uma descrição dos principais passos locomotores dos animais quadrúpedes, e a sua classificação segue-se na secção 2.3. Por último, na secção 2.4, analisa-se a bifurcação dos passos locomotores primários.

### 2.1. SIMETRIA DOS MODELOS

#### 2.1.1. REDE DA FIGURA 1 A)

Este modelo de CPG para quadrúpedes é caracterizado por uma rede de quatro células/osciladores acoplados, com simetria  $D_2$  (simetria rectangular). Produz soluções periódicas identificadas com os passos locomotores quadrúpedes: *trot*, *pace* e *bound*. A simetria rectangular é apropriada em animais cujas pernas traseiras e dianteiras são mais ou menos idênticas, mas onde os acoplamentos frente/traseira e esquerda/direita são substancialmente diferentes.

O modelo da Figura 1 a) é representado por um grafo, onde cada nó ou vértice representa uma célula e onde cada ramo representa o acoplamento entre as mesmas. As células são 4 e estão numeradas de 1 a 4 (o que significa que cada célula controla uma perna). Todas as células estão representadas por um círculo, o que indica que são todas iguais, isto é, todas têm a mesma dinâmica interna. O modelo de CPG é assim constituído por 4 osciladores idênticos acoplados. Há três tipos de setas o que indica que há três tipos distintos de acoplamento.

As setas a cheio indicam que os sinais que são enviados para as células 1 e 2 podem ser trocados, se os das células 3 e 4 também forem. Esta permutação será designada por  $\rho$ . As setas a tracejado significam que os sinais enviados às células 1 e 3 podem ser trocados se forem trocados os sinais das células 2 e 4. Esta permutação será designada por  $\tau$ . No caso das setas a picotado, os sinais das células 1 e 4 podem ser trocados desde que também se troque os das células 2 e 3. Esta permutação é uma composição das permutações anteriores, designando-se portanto por  $\rho\tau$ . Em conjunto com a Identidade, estas permutações compõem o grupo de simetrias  $D_2$ . Pode escrever-se:

$$D_2 = \langle \rho \rangle \times \langle \tau \rangle \quad (1)$$

A dinâmica interna de cada célula é tipicamente definida por um sistema de equações diferenciais ordinárias (ODE's). A classe geral de sistemas de equações diferenciais ordinárias que modelam o modelo de CPG para robôs quadrúpedes é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = F(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \dot{x}_2 = F(x_2, x_1, x_4, x_3) \\ \dot{x}_3 = F(x_3, x_4, x_1, x_2) \\ \dot{x}_4 = F(x_4, x_3, x_2, x_1) \end{cases} \quad (2)$$

onde  $x_i \in R^k$  representa a dinâmica interna da célula  $i \in \{1,2,3,4\}$  e  $k \in N$  a dimensão da dinâmica.

### 2.1.2. REDE DA FIGURA 1 B)

O modelo da Figura 1b) tem simetria quadrada  $D_4$ . Esta rede tem mais simetria do que a rede da Figura 1a). O grupo de simetria  $D_4$  é gerado pelas permutações  $\alpha = (1243)$  e

$\beta = (12)(34)$  [5]. Com esta rede é possível obter o passo locomotor *walk*. Existem apenas dois tipos de acoplamento, representados por dois tipos de setas distintas. A seta a cheio indica que o que acontece entre as células 1 e 2 é independente do que se passa entre as células 3 e 4, isto é, as células 1 e 2 podem ser trocadas entre si sem obrigar a uma troca nas células 3 e 4, ou vice-versa. Este tipo de rede é apropriado para quadrúpedes em que o acoplamento entre pernas traseiras e dianteiras se faz através da coluna vertebral.

## 2.2. PASSOS LOCOMOTORES DOS QUADRÚPEDES

Os passos locomotores quadrúpedes mais comuns são: *walk*, *trot*, *pace* e *bound*. O *walk* é um passo locomotor que se caracteriza pelo movimento das quatro pernas com um quarto de período de desfasamento entre cada uma delas. A sequência de movimentos inicia-se com a perna da frente esquerda, seguida da traseira direita, depois a perna da frente direita e por fim a perna traseira esquerda, todos eles com um quarto de período de diferença. (Figura 2).

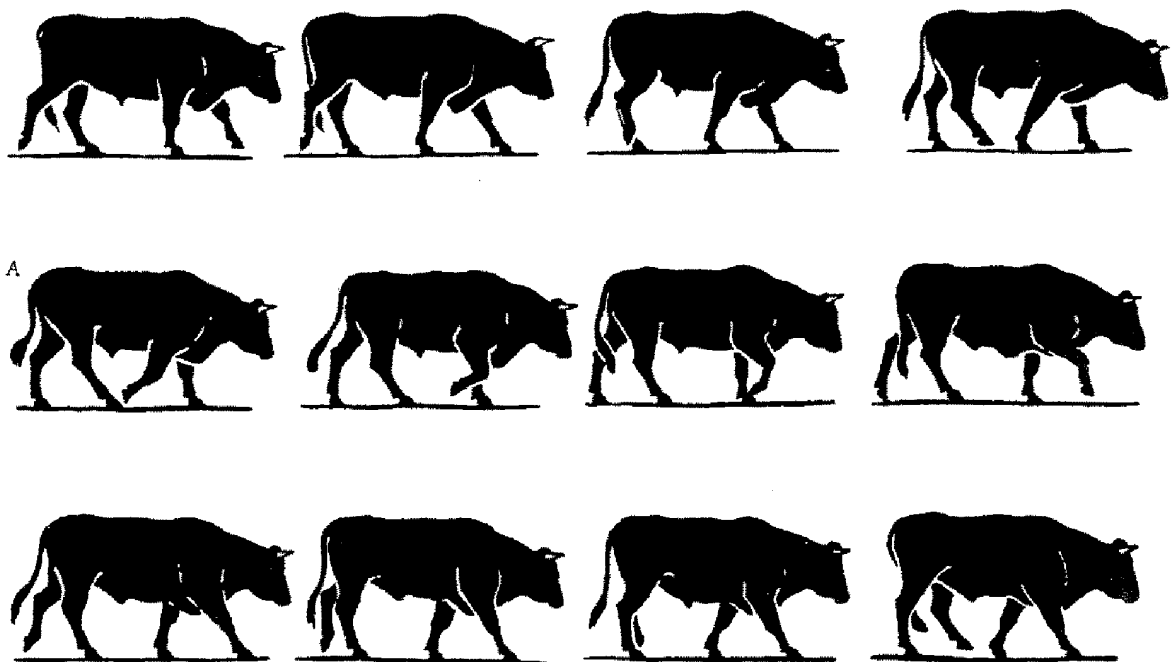


Figura 2 Walk [10].

O *trot* é, provavelmente, um dos passos mais conhecidos uma vez que está intimamente ligado ao movimento do cavalo. Este caracteriza-se pelo movimento simultâneo das pernas nas diagonais, estando os dois pares de pernas diagonais desfasados de meio período entre

si. As pernas frente esquerda e traseira direita movem-se em simultâneo, desfasadas de meio período das pernas frente direita e traseira esquerda (Figura 3). Tal como referido, o *trot* é mais conhecido por ser um passo locomotor do cavalo, no entanto também pode ser visto noutros animais, como por exemplo o cão.

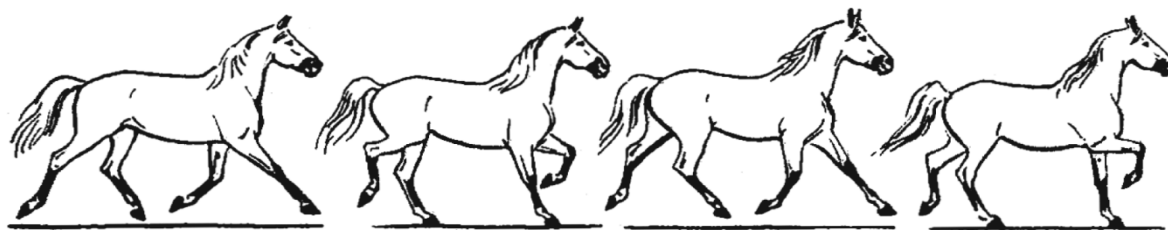
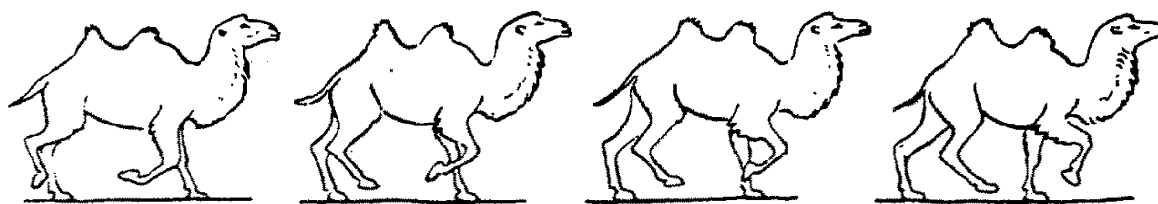


Figura 3 Trot [10].

No *pace*, as pernas de cada lado movem-se simultaneamente, ou seja, as pernas frente e traseira direita movem-se ao mesmo tempo, desfasadas de meio período das pernas frente e traseira esquerda (Figura 4). Este é um passo característico dos camelos, mas também pode ser visto nos lamas.



A

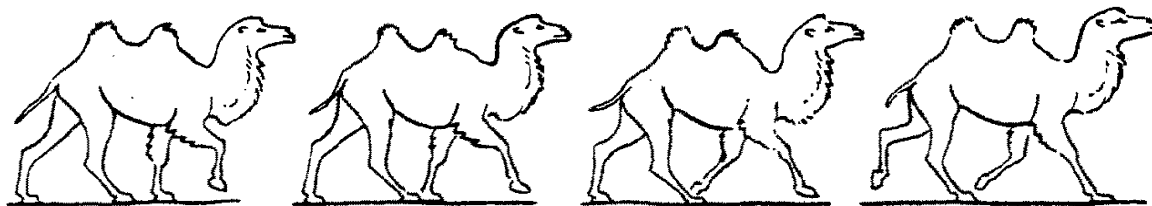


Figura 4 Pace [10].

O conjunto de passos locomotores quadrúpedes mais comuns termina com o *bound*. Neste caso são as pernas da frente que se movem em simultâneo e desfasadas de meio período das pernas traseiras (Figura 5). No mundo animal este passo pode ser visto nos coelhos e nas lebres.





Figura 5 *Bound* [10].

Para além destes passos, existem ainda mais alguns passos interessantes, o *transverse gallop*, *rotary gallop* e o *pronk*. O *transverse gallop* assemelha-se ao bound, todavia, neste passo, as patas da frente/ traseira estão ligeiramente desfasadas entre si. A pata esquerda traseira está desfasada de meio período da pata esquerda dianteira. A pata direita traseira está desfasada de meio período da pata direita dianteira (Figura 6). Mais uma vez, um exemplo real deste passo verifica-se no cavalo.

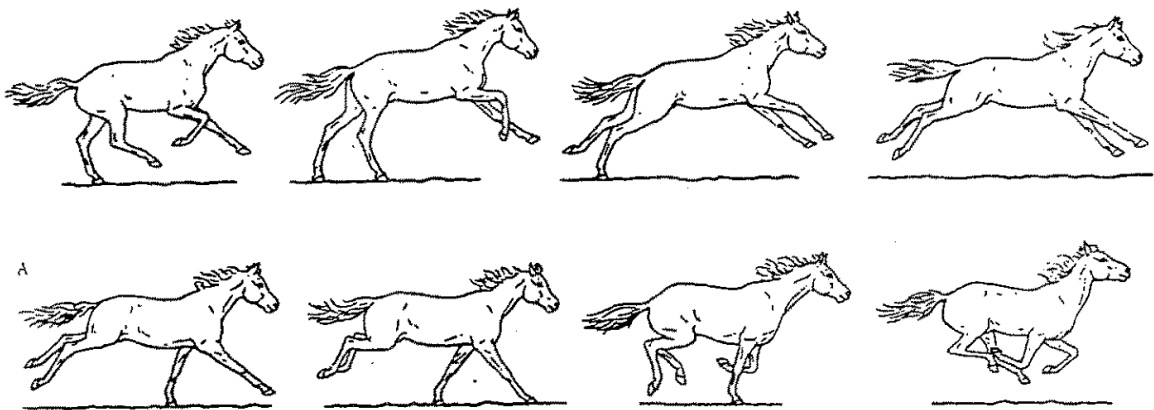


Figura 6 *Transverse Gallop* [10].

O *rotary gallop* é semelhante ao *transverse gallop*, no entanto o desfasamento de meio período verifica-se agora entre os pares de pernas nas diagonais (Figura 7). Este é o passo locomotor que se verifica na elevada velocidade das chitas.

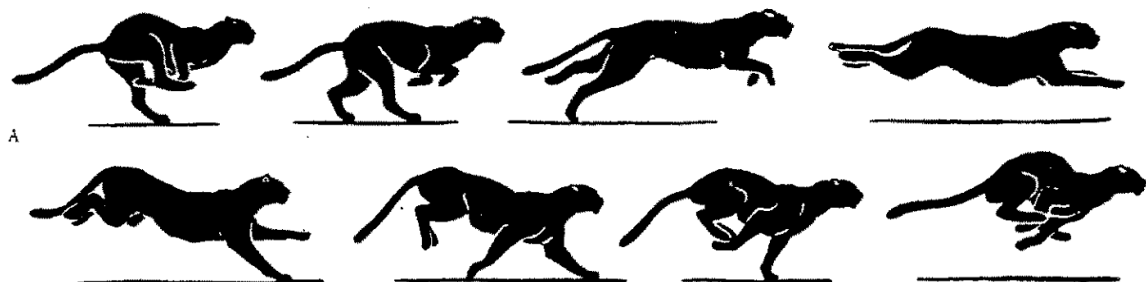
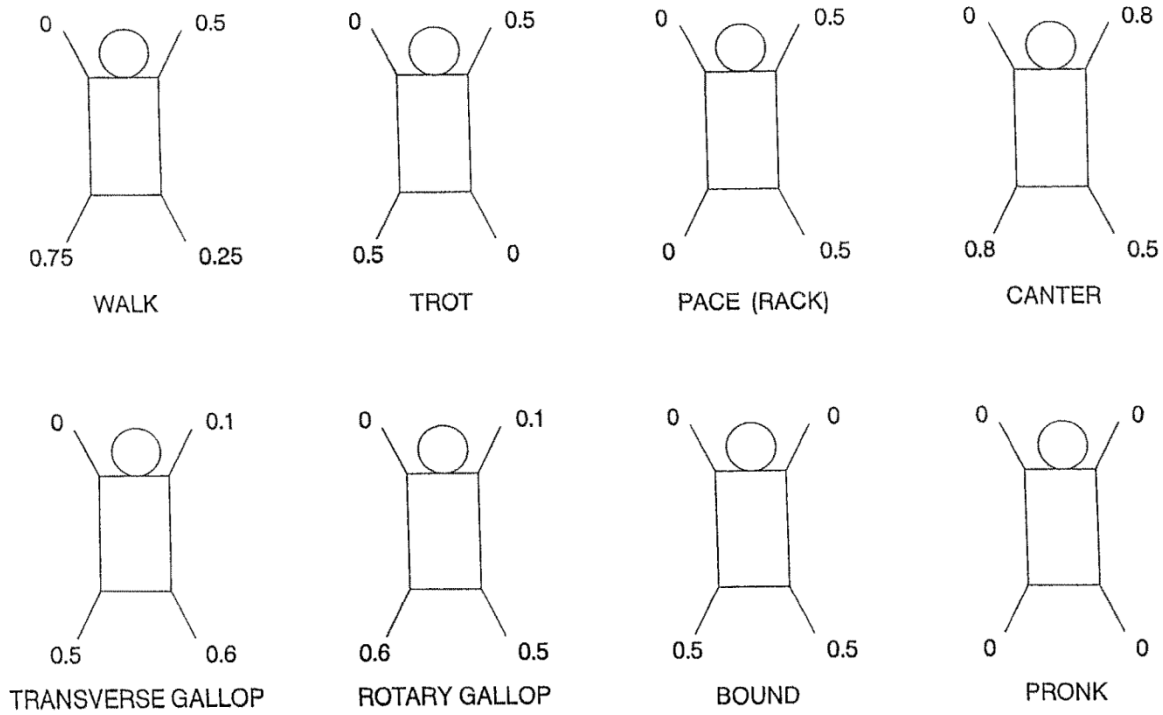


Figura 7 *Rotary Gallop* [10].

Pode ser verificado na Figura 8, a relação de fase entre as diferentes pernas nos passos locomotores de um quadrúpede, conforme descritos anteriormente.



**Figura 8** Relações de fase dos passos locomotores [26].

### 2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PASSOS LOCOMOTORES

Os passos locomotores dos quadrúpedes são classificados recorrendo ao teorema  $H/K$  [9]. Estes passos são identificados com soluções periódicas, com período  $T$ , produzidas pelo sistema de ODE's associado ao modelo. Considere-se  $H$  e  $K$ , dois subgrupos do grupo de simetrias do modelo, tais que uma solução periódica  $x(t)$  tem o par de simetrias  $(H, K)$ . O subconjunto  $K$  consiste no conjunto de simetrias  $k$ , tais que  $kx(t) = x(t)$ , ou seja, estas simetrias fixam espacialmente a solução, transformando-a nela própria. O subgrupo  $H$  consiste no conjunto de simetrias  $h$  tais que  $hx(t + \theta) = x(t)$ , onde  $\theta$  é o deslocamento. Nestas simetrias, a solução é transformada nela própria com deslocamento no tempo de  $\theta$ . As simetrias  $k$  são designadas por simetrias espaciais, e as simetrias  $h$  por simetrias espácio-temporais.

### 2.3.1. MODELO DA FIGURA 1A)

A aplicação do Teorema  $H/K$  ao grupo de simetrias  $D_2$  do sistema (1) resulta nas soluções periódicas e respectivos pares de simetrias espaciais e espaço-temporais dados na Tabela 1. A tabela representa ainda os passos locomotores dos quadrúpedes identificados com essas soluções periódicas. Há outros pares de simetrias espaciais e espaço-temporais cujas soluções periódicas não estão neste momento identificadas com nenhum passo locomotor dos quadrúpedes.

**Tabela 1** Passos Locomotores dos quadrúpedes segundo rede da Figura 1a)

$H$	$K$	Lado Esquerdo	Lado Direito	Passo
$D_2$	$D_2$	$(x_1(t), x_1(t))$	$(x_1(t), x_1(t))$	<i>Pronk</i>
$D_2$	$\rho\tau$	$\left(x_1(t), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	$\left(x_1\left(t + \frac{1}{2}\right), x_1(t)\right)$	<i>Trot</i>
$D_2$	$\rho$	$\left(x_1(t), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	$\left(x_1(t), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	<i>Bound</i>
$D_2$	$\tau$	$(x_1(t), x_1(t))$	$\left(x_1\left(t + \frac{1}{2}\right), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	<i>Pace</i>
$\rho\tau$	Id	$\left(x_1(t), x_2\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	$\left(x_2(t), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	<i>Rotary Gallop</i>
$\tau$	Id	$\left(x_1(t), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	$\left(x_2(t), x_2\left(t + \frac{1}{2}\right)\right)$	<i>Transverse Gallop</i>

### 2.3.2. MODELO DA FIGURA 1B)

Como estamos interessados apenas no passo locomotor *walk* produzido por esta rede, apresentam-se apenas os cálculos relativos a este passo locomotor. A simetria espaço-temporal  $H$  é  $D_4$  e a simetria espacial é  $K = Z_4 = \langle \alpha \rangle$ . Pelo que a solução periódica indentificada com o *walk* é:

$$(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)) = \left(x_1(t), x_1\left(t + \frac{3}{4}\right), x_1\left(t + \frac{1}{4}\right), x_1\left(t + \frac{1}{2}\right)\right) \quad (3)$$

## 2.4. BIFURCAÇÃO DOS PASSOS PRIMÁRIOS

### 2.4.1. REDE DA FIGURA 1 A)

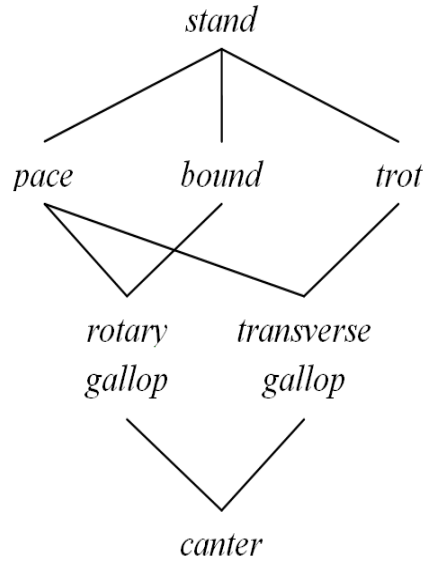
Os passos locomotores primários, obtidos por este modelo, são bifurcações de um equilíbrio invariante por  $D_2$ ,  $X = (x, x, x, x)$ . Estes passos primários têm sempre o mesmo desfasamento entre pernas, por exemplo, *trot*, *pace* e *bound*, o desfasamento entre pernas é sempre igual a meio período. Os passos secundários são obtidos por bifurcações de quebra de simetria dos passos primários, ou, dito de outra forma, são transições de fase num sistema sinérgico. Neste cálculo são utilizadas propriedades das aplicações de Poincaré [30]. Os passos secundários obtidos por quebra de simetria dos passos primários descritos são o *transverse gallop* e o *rotary gallop*.

Pode encontrar-se na Tabela 2 todos os passos secundários obtidos através do modelo de CPG de 4 células da Figura 1a) por quebra de simetrias dos passos locomotores primários.

**Tabela 2** Passos secundários obtidos por quebra de simetria dos passos primários

<b>Passo Primário</b>	<b>Passo Secundário</b>
<i>Trot</i>	<i>Transverse Gallop</i>
<i>Pace</i>	<i>Rotary Gallop</i>
<i>Bound</i>	<i>Rotary Gallop</i> <i>Transverse Gallop</i>

Na Figura 9 esquematizam-se as bifurcações existentes na rede de 4 células da Figura 1a) a partir do *stand*. A simetria é menor à medida que se desce no esquema.



**Figura 9** Diagrama de bifurcações dos passos locomotores da Figura 1a) [5].

#### 2.4.2. REDE DA FIGURA 1 B)

O passo primário *walk* é obtido por uma bifurcação de Hopf de um equilíbrio invariante por  $D_4$  (*stand*). A solução periódica identificada com o *walk* é dada por:

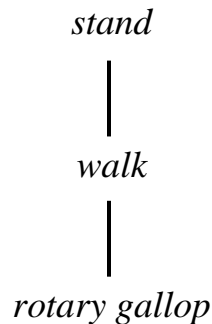
**Tabela 1** Passos Locomotores dos quadrúpedes segundo rede da Figura 1b)

Lado Esquerdo	Lado Direito	Passo
$\left( x_1(t), x_1\left(t + \frac{3}{4}\right) \right)$	$\left( x_1\left(t + \frac{1}{2}\right), \left(t + \frac{1}{4}\right) \right)$	<i>Walk</i>

A simetria deste passo locomotor é  $Z_4(\alpha)$  e o desfasamento entre os sinais enviados para as 4 patas é de um quarto de período.

Em semelhança ao modelo anterior, os passos secundários são obtidos por quebra de simetria dos passos primários. O passo locomotor secundário *rotary gallop* é obtido a partir do *walk*.

Na Figura 10 apresenta-se o esquema reduzido, referente apenas ao passo locomotor *walk*, das bifurcações existentes na rede de 4 células da Figura 1b) a partir do *stand*. A simetria é menor à medida que se desce no esquema.



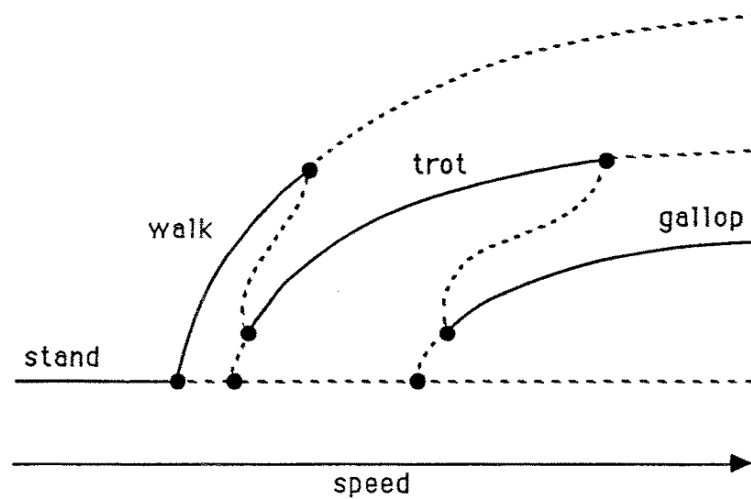
**Figura 10 Diagrama de bifurcações reduzido dos passos locomotores da Figura 1b).**

### **2.4.3. EXPLICAÇÃO FISIOLÓGICA DAS TRANSIÇÕES DE PASSOS LOCOMOTORES**

Durante a sua locomoção, os animais sentem necessidade de mudar de passo locomotor, ou seja, de transitar entre passos locomotores distintos. Estas transições podem ser associadas, matematicamente, às bifurcações por quebra de simetria de uma para outra solução periódica. Schöner *et al* [36] referem-se a transições de fase em sistemas sinérgicos. Estas transições podem ser vistas como bifurcações de quebra de simetria.

Há outras bifurcações que conduzem também a transições entre passos locomotores, designam-se de histereses. Hoyt e Taylor [18] concluem que o consumo de oxigénio está relacionado com a velocidade. Para reduzir o consumo de oxigénio, os animais efectuem transições de passos locomotores conforme a velocidade a que se deslocam (Figura 11). O oxigénio utilizado pelos animais poderá ser equiparado ao consumo de energia dos robôs quadrúpedes, o objectivo é, em ambos os casos, o menor consumo de energia em qualquer ponto de funcionamento. O facto das linhas a cheio da Figura 11 estarem sobrepostas, por exemplo, no caso do *trot* e do *gallop*, sugere que estamos perante uma bifurcação por histerese. Este tipo de bifurcação caracteriza-se por existirem mais do que um ponto de transição entre dois passos diferentes. Por exemplo, com o aumento de velocidade, o animal transita de *trot* para *gallop* num determinado ponto, mas em sentido inverso, a

transição é feita num ponto diferente do anterior. Devido a este fenómeno, é formada uma espécie de malha, conhecida por malha de histerese.



**Figura 11** Diagrama de transições conforme a velocidade do animal [18].





### 3. SIMULAÇÕES DOS MODELOS

Neste capítulo apresentam-se as simulações numéricas das duas redes de quatro osciladores que modelam, em tempo real, as trajectórias de um robot quadrúpede. Consideram-se, como dinâmica da parte rítmica de cada célula, o oscilador de Hopf e as equações de Morris-Lecar. As simulações distinguiram-se em dois tipos distintos: o primeiro refere-se apenas à parte rítmica, o segundo acrescenta à parte rítmica a parte discreta. Esta inclusão pode ser embebida, incluída como um *offset* ou adicionada às expressões rítmicas, ou pode ser calculada independentemente e adicionada exactamente antes do envio dos resultados para o robô. Foram analisadas as respostas do sistema em amplitude e frequência para alterações do parâmetro  $g \in [-5;5]$ .

### 3.1. SISTEMA RÍTMICO

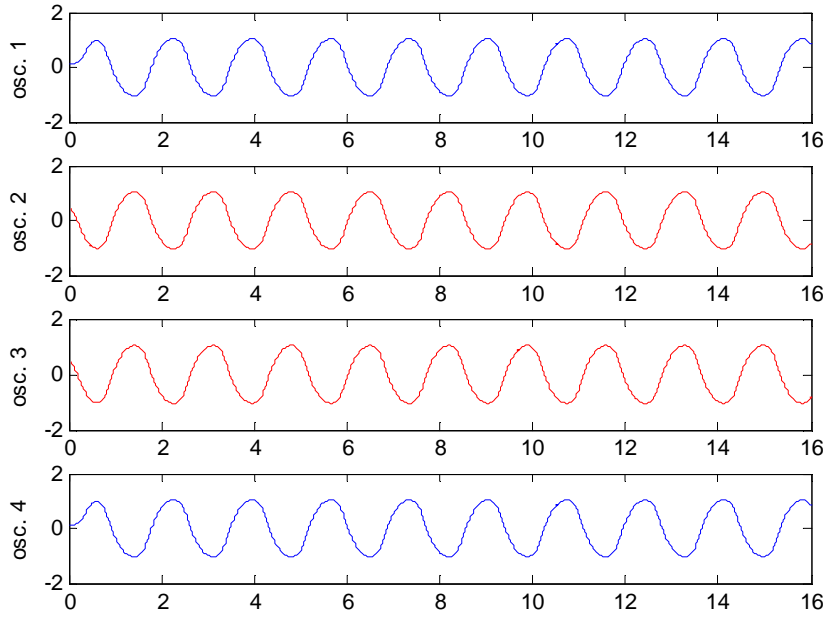
#### 3.1.1. OSCILADOR DE HOPF

O oscilador de Hopf é constituído por um sistema de equações diferenciais ordinárias não-lineares de dimensão 2. O modelo de 4 osciladores de Hopf para a rede da Figura 1a) é dado por:

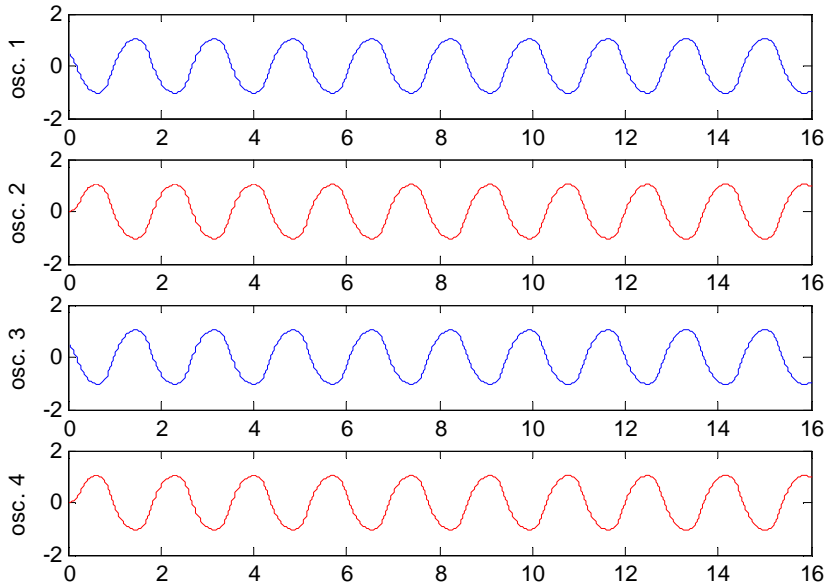
$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)x_i - \omega_i z_i \\ \dot{z}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)z_i + \omega_i x_i + \sum_j k_{ij}z_j \\ \omega_i &= \frac{\omega_{down}}{e^{-bz_i} + 1} + \frac{\omega_{up}}{e^{-bz_i} + 1}\end{aligned}\tag{4}$$

onde  $r_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$ ,  $\omega_i$  é a frequência de oscilação em  $\text{rad.s}^{-1}$ ,  $\omega = \sqrt{\mu}$  é a amplitude de oscilação.  $\omega_{down}$  e  $\omega_{up}$  são as velocidades das fases ascendente e descendente da oscilação, respectivamente.  $\alpha$  é uma constante positiva que controla a velocidade de convergência.

A partir deste sistema de equações, é possível obter todos os passos primários previstos pela Figura 1a), tais como *trot* e *pace*, como se pode verificar na Figura 12 e Figura 13 respectivamente.



**Figura 12** Passo locomotor *trot*, usando o sistema (4).



**Figura 13** Passo locomotor *pace*, usando o sistema (4).

### 3.1.2. EQUAÇÕES DE MORRIS-LECAR

As equações de Morris-Lecar foram sugeridas para descrever as oscilações na fibra muscular dos crustáceos. Este modelo é baseado num estudo [17] que diz que o potencial de acção depende essencialmente de dois canais iónicos,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . O modelo de Morris-

Lecar, no entanto, desenvolve-se sobre os canais  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ . Estes canais são representados pelas respectivas condutâncias,  $g_{ca}$ , e  $g_k$ , e pela condutância de vazamento (do inglês “*leak*”),  $g_l$  [27].

O sistema de equações diferenciais ordinárias que modela os 4 osciladores que constituem a rede da Figura 1a) é dado por:

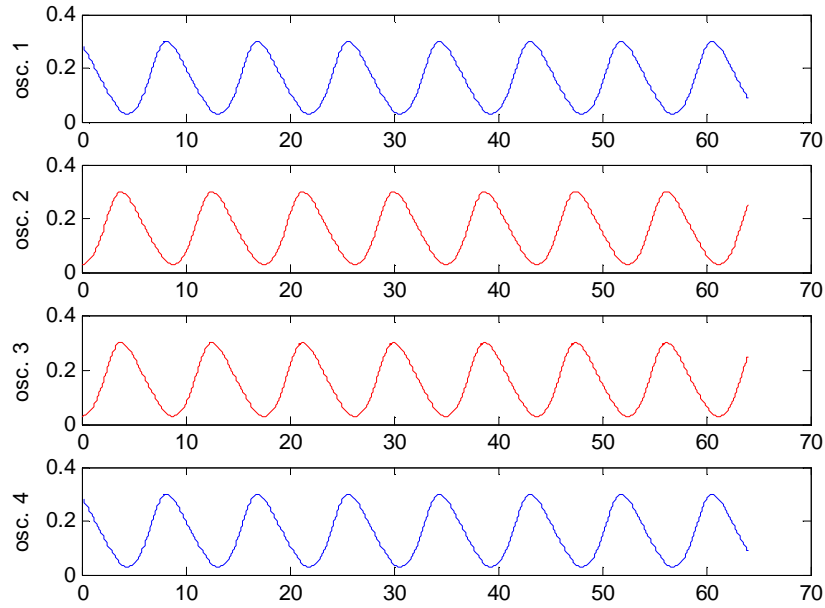
$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= -g_{Ca} \cdot f m_i \cdot (x_i - 1) - g_l \cdot (x_i - v_l) - g_k \cdot z_i \cdot (x_i - v_k) + i + \sum_j k_{ij} z_j \\ \dot{z}_i &= \phi_i \cdot \tau_i \cdot (f n_i - z_i)\end{aligned}\tag{5}$$

As funções de activação e a constante de tempo são dadas por:

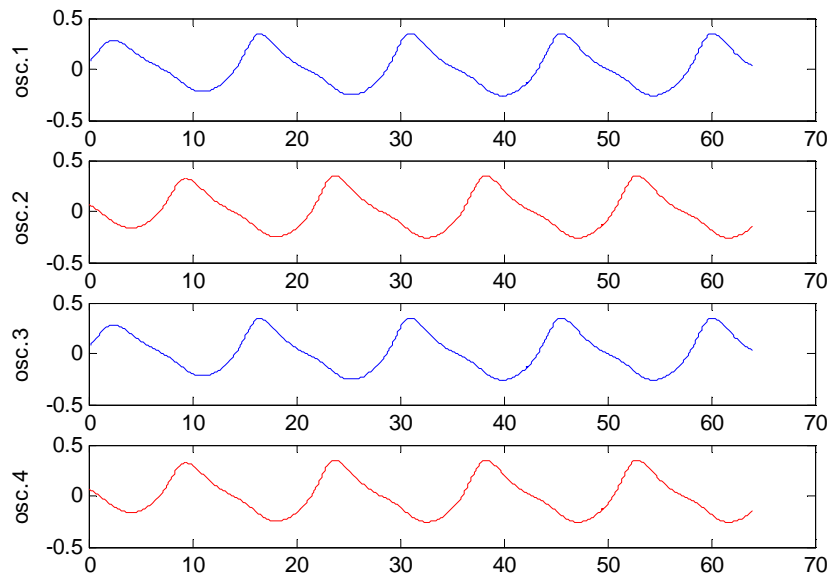
$$\begin{aligned}f m_i &= \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \tanh \left( \frac{x_i - v_1}{v_2} \right) \right) \\ \tau_i &= \cosh \left( \frac{x_i - v_3}{2 \cdot v_4} \right) \\ f n_i &= \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \tanh \left( \frac{x_i - v_3}{v_4} \right) \right)\end{aligned}\tag{6}$$

Onde  $g_{ca}$ ,  $g_k$  e  $g_l$  são as condutâncias de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e de vazamento respectivamente,  $i$  é a corrente aplicada,  $v_l$  e  $v_k$  são as tensões de equilíbrio correspondentes às condutâncias de vazamento e  $\text{K}^+$ , e  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  e  $v_4$  são os parâmetros para a activação e para a função de constante de tempo.

Com este sistema de equações é possível obter, tal como no caso do oscilador de Hopf, todos os passos locomotores primários da Figura 1.a), entre eles, *trot* (Figura 14) e *pace* (Figura 15).



**Figura 14** Passo locomotor *trot*, usando o sistema (5).



**Figura 15** Passo locomotor *pace*, usando o sistema (5).

Através deste modelo é também possível obter uma transição de passos locomotores. Neste caso, conseguiu-se obter o passo secundário *transverse gallop* a partir do *trot*. Para obter esta transição alterou-se o valor de apenas uma força de acoplamento, obrigando assim a uma quebra de simetria no modelo.

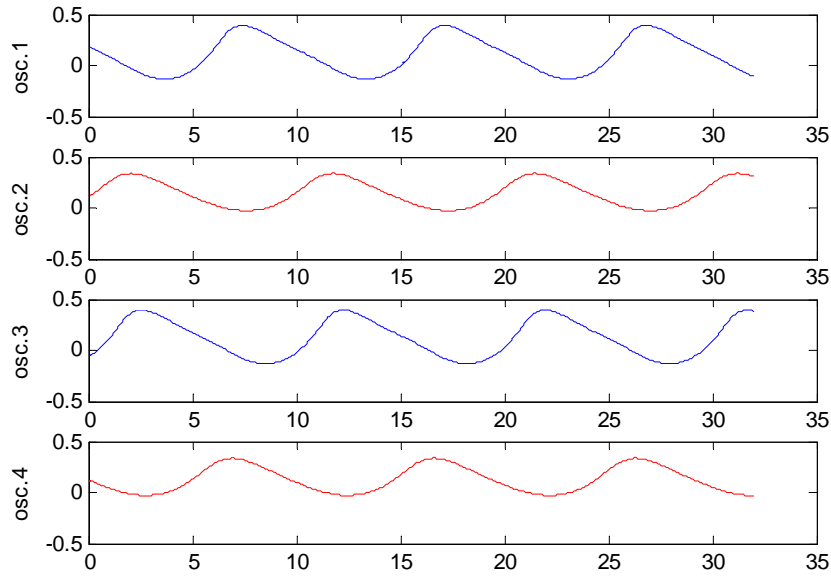


Figura 16 Passo locomotor secundário *transverse gallop*, obtido através do *trot* no sistema (5).

### 3.2. SISTEMA RÍTMICO E DISCRETO

Neste capítulo é acrescentada a parte discreta à parte rítmica do movimento. A inserção da parte discreta será testada de duas formas: (a) a componente discreta,  $y_i$ , é embebida na parte rítmica (Figura 17.a); ou (b) a componente discreta,  $y_i$ , é adicionada à solução da componente rítmica do sistema (Figura 17.b).

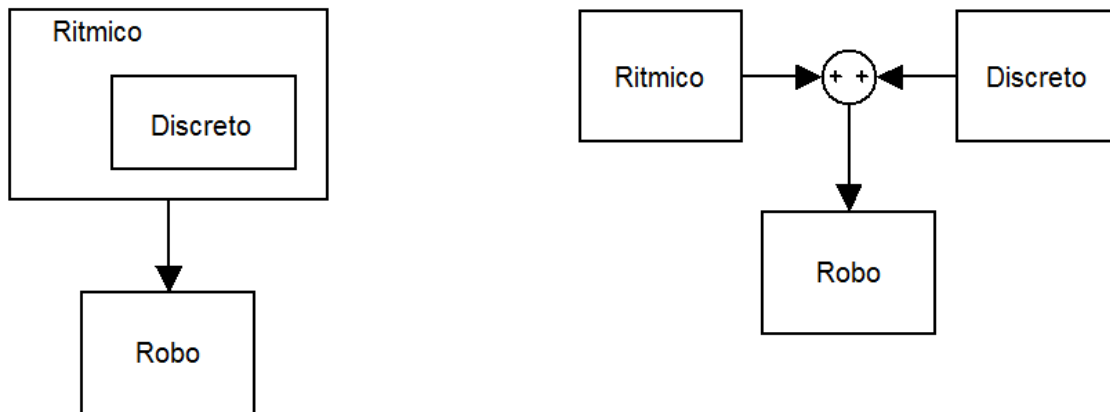


Figura 17 Componente discreta: a) embebida na parte rítmica (esquerda) e b) somada á parte rítmica (direita).

No caso de ser embebido na parte rítmica, a parte discreta pode ser acrescentada (a.1) como um *offset* ou (a.2) somada nas equações que modelam a parte rítmica.

O sistema discreto é constituído pelas seguintes equações diferenciais ordinárias, inspiradas no modelo VITE [6]:

$$\begin{aligned} \dot{h}_i &= d(p - h_i) \\ \dot{y}_i &= h_i^4 v_i \\ \dot{v}_i &= p^4 \frac{-b^2}{4} (y_i - g_i) - b v_i \end{aligned} \tag{7}$$

onde a velocidade de convergência é controlada por  $b$ ,  $p$  e  $d$  são valores escolhidos para assegurar que a função velocidade tem a forma de sino.  $g$  é um parâmetro que fará variar o *offset* do sistema.

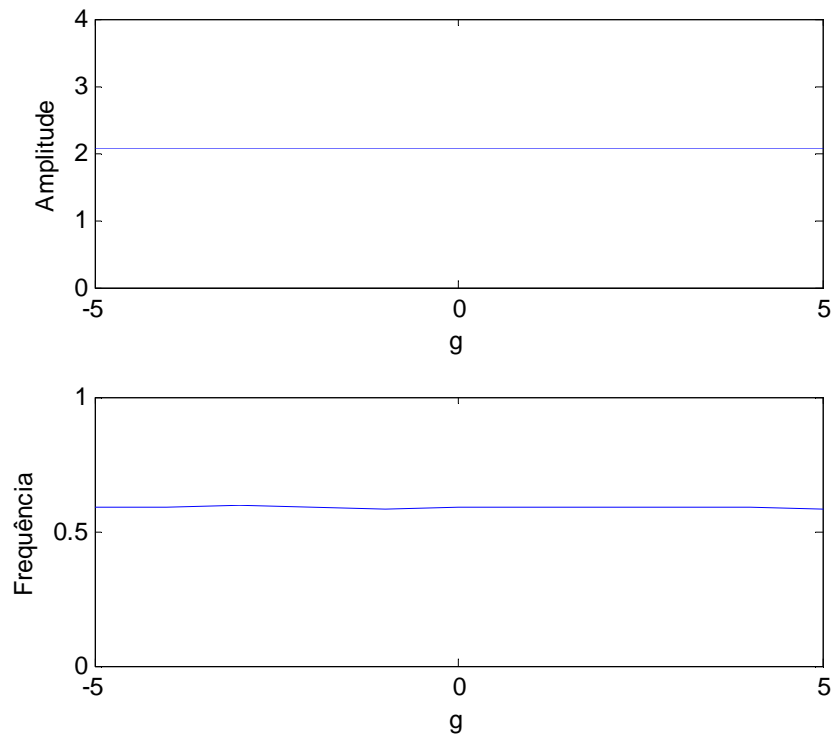
### 3.2.1. OSCILADOR DE HOPF

Usa-se o oscilador de Hopf para modelar a parte rítmica do movimento.

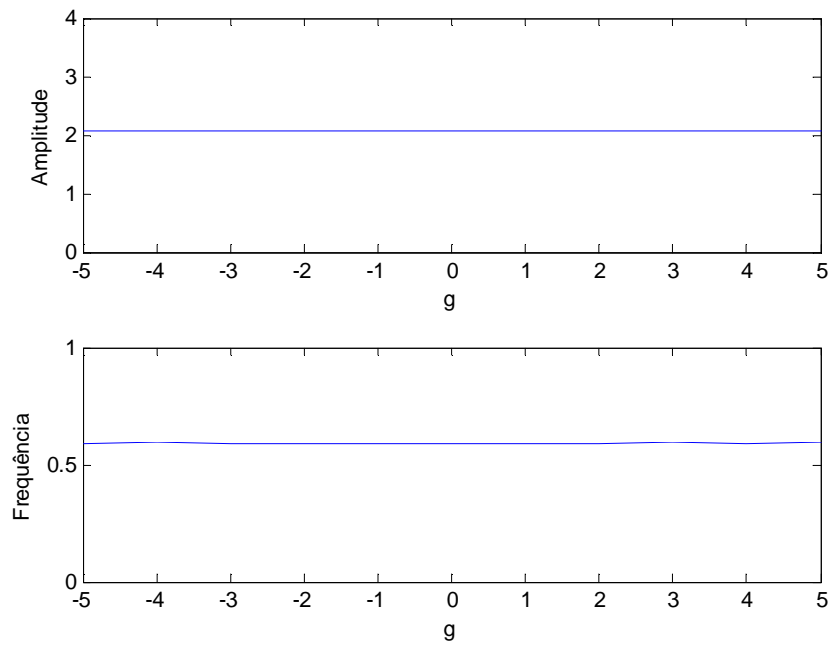
Começa-se por embeber a componente discreta na rítmica, adicionando-a (a.1) como um *offset*. O sistema de equações diferenciais ordinárias que modela a rede da Figura 1.a) é agora dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)(x_i - y_i) - \omega_i z_i \\ \dot{z}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)z_i + \omega_i(x_i - y_i) + \sum_j k_{ij}z_j \end{aligned} \tag{8}$$

Nas simulações numéricas, variou-se o parâmetro  $g$  e mediram-se a amplitude e a frequência das soluções periódicas identificadas com os passos locomotores *trot* (Figura 18) e *pace* (Figura 19).



**Figura 18** Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *trot*, para variação de  $g$ , usando o sistema (8).

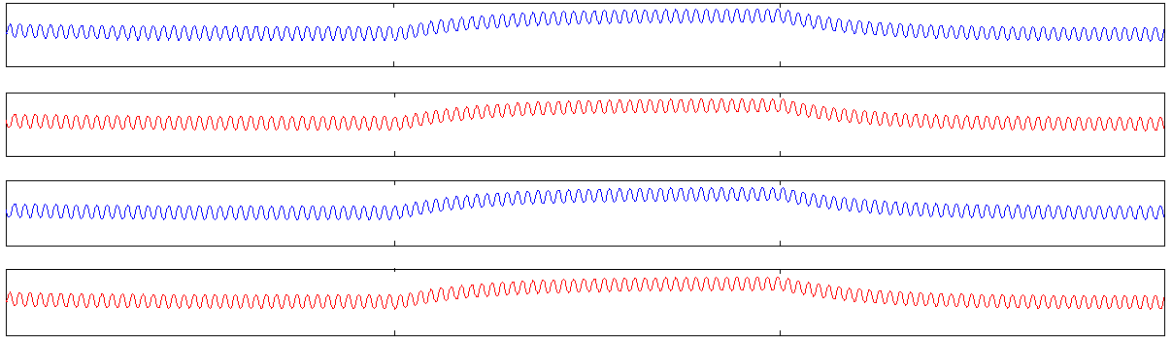


**Figura 19** Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *pace*, para variação de  $g$ , usando o sistema (8).



Neste caso, verifica-se que a amplitude e a frequência se mantêm constantes para  $-5 > g > 5$ .

Para que se perceba melhor a influência da inserção da parte discreta na parte rítmica, apresenta-se a Figura 20. Para obter esta figura simulou-se o modelo de CPG só com parte rítmica, de seguida incluiu-se a parte discreta e por fim voltou a retirar-se a discreta ficando apenas a parte rítmica.



**Figura 20 Solução periódica identificada com o *trot*, onde se pode verificar a inclusão da parte discreta na parte rítmica (a 1/3 da figura) e remoção da mesma (a 2/3 da figura) para  $g=3,0$ .**

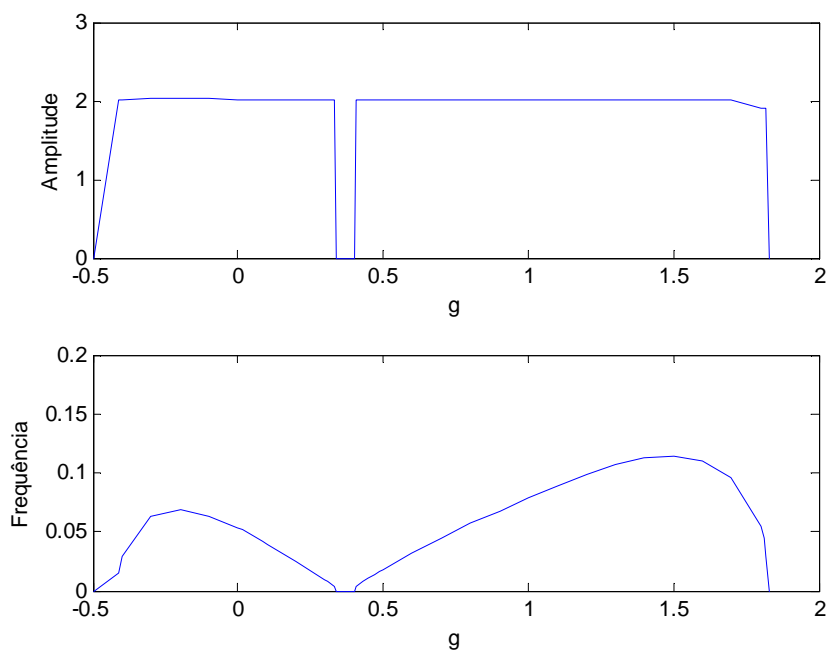
Com esta figura, verifica-se que não existe qualquer alteração na amplitude e na frequência quando se inclui a parte discreta, havendo apenas um deslocamento (*offset*) da resposta do sistema

A segunda possibilidade de incluir a parte discreta embebida na parte rítmica é (a.2) somando  $y_i$  nas equações que modelam a parte rítmica. O sistema de equações diferenciais ordinárias que modela a rede de osciladores da Figura 1.a) é dado por:

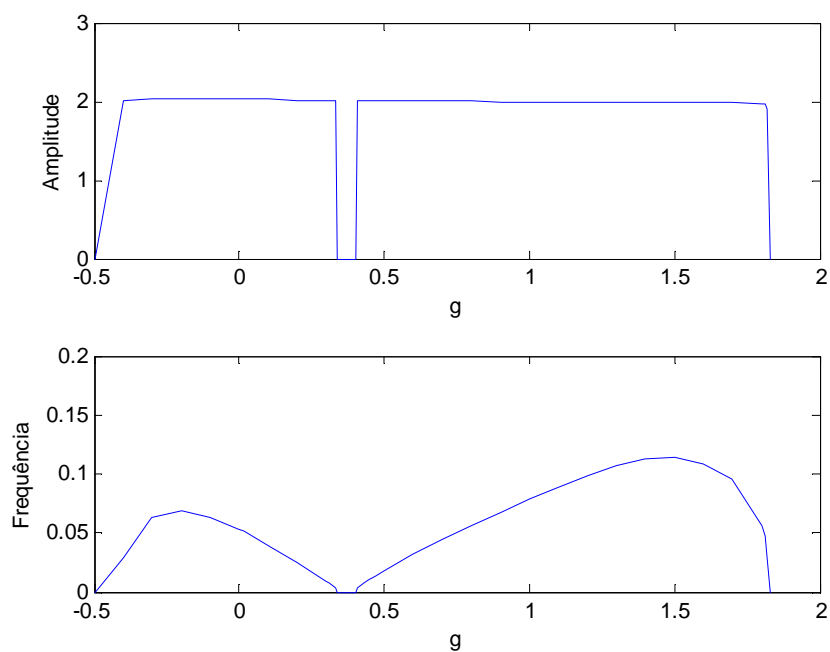
$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)x_i - \omega_i z_i - y_i \\ \dot{z}_i &= \alpha(\mu_i - r_i^2)z_i + \omega_i x_i + \sum_j k_{ij}z_j - y_i\end{aligned}\tag{9}$$

As equações do sistema discreto são as mesmas do caso anterior, (7).

Tal como anteriormente, variou-se o parâmetro  $g$  em soluções periódicas identificadas com os passos locomotores *trot* (Figura 21) e *pace* (Figura 22) e mediram-se a amplitude e a frequência dessas soluções periódicas.



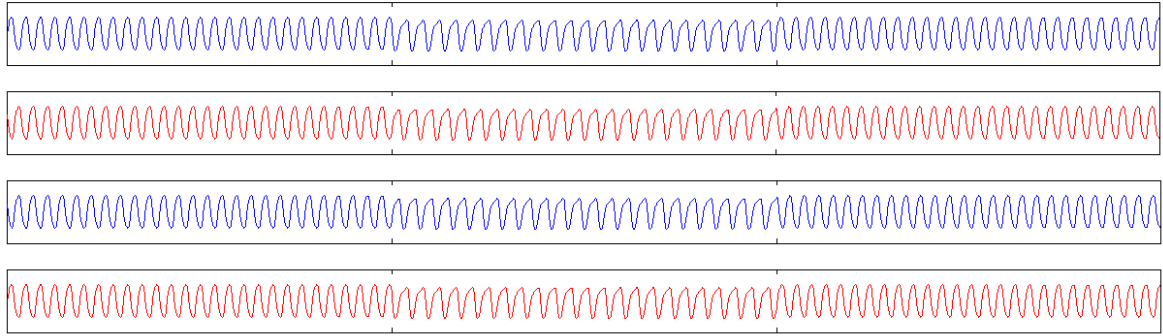
**Figura 21** Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *trot*, para variação de  $g$ , usando o sistema (9) (gráfico rescalado de  $[-5,5]$  para  $[-0.5;2]$ ).



**Figura 22** Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *pace*, para variação de  $g$ , usando o sistema (9) (gráfico rescalado de  $[-5,5]$  para  $[-0.5;2]$ ).

Contrariamente ao ocorrido no caso anterior, tanto a amplitude como a frequência variam e de forma idêntica. Crescem e decrescem nos intervalos  $[-0.5, 0.34]$  e  $[0.4, 1.83]$  de  $g$ , sendo nos restantes valores de  $g$  nulas.

Mais uma vez, para se perceber melhor o papel da parte discreta neste sistema, apresenta-se a Figura 23.

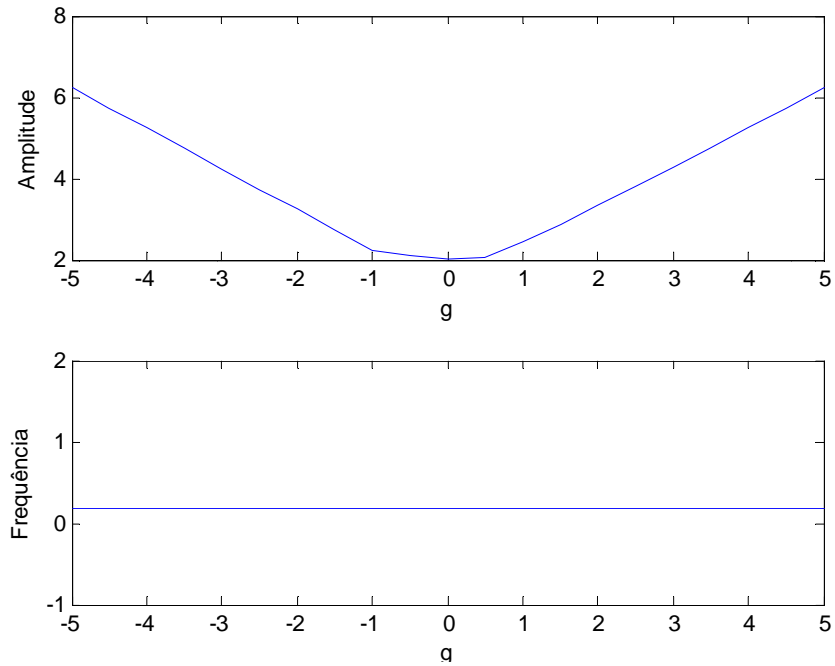


**Figura 23 Solução periódica identificada com o *trot*, onde se inclui (1/3 da figura) e remove (2/3 da figura) a parte discreta para  $g=1,5$ .**

Nesta figura, a inclusão e remoção da parte discreta, traduz-se numa alteração dos valores da amplitude e da frequência. O sinal apresenta uma maior frequência e uma ligeira diminuição da amplitude. Isto pode traduzir-se como um aumento da velocidade do passo locomotor e uma menor extensão do movimento. Para outros valores de  $g$ , obter-se-iam outros valores para a frequência e a amplitude, consoante se pode observar nos gráficos das Figura 21 e Figura 22.

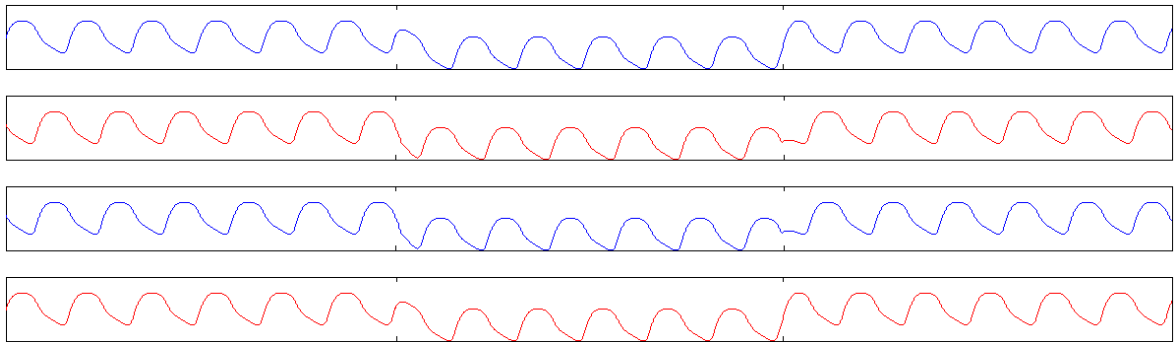
A terceira opção testada para incluir a parte discreta no movimento do robô é dada pela soma das duas componentes, rítmica e discreta, conforme Figura 17.b), tem-se  $x_i(t) = x_i(t) + y_i(t)$ . As expressões da parte rítmica e discreta são iguais aos casos anteriores, (5) e (7).

Mais uma vez se varia o parâmetro  $g$  e se medem a amplitude e a frequência das soluções periódicas identificadas com o passo locomotor *trot*. Os resultados podem ser vistos na Figura 24.



**Figura 24 Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *trot*, para variação de  $g$ , segundo Figura 17.b)**

Como se pode verificar, a amplitude decresce para  $g < 0.2$  e cresce para  $g > 0.2$ . A frequência mantém-se constante para qualquer valor de  $g$ .



**Figura 25 Solução periódica identificada com o *trot*, onde se inclui (1/3 da figura) e se remove (2/3 da figura) a parte discreta para  $g=1,0$ .**

Como se pode ver na Figura 25, após a inclusão da parte discreta, para um determinado valor de  $g$ , observa-se um deslocamento do sinal e, apesar de não ser visível, existe um aumento da amplitude. A frequência mantém-se constante.

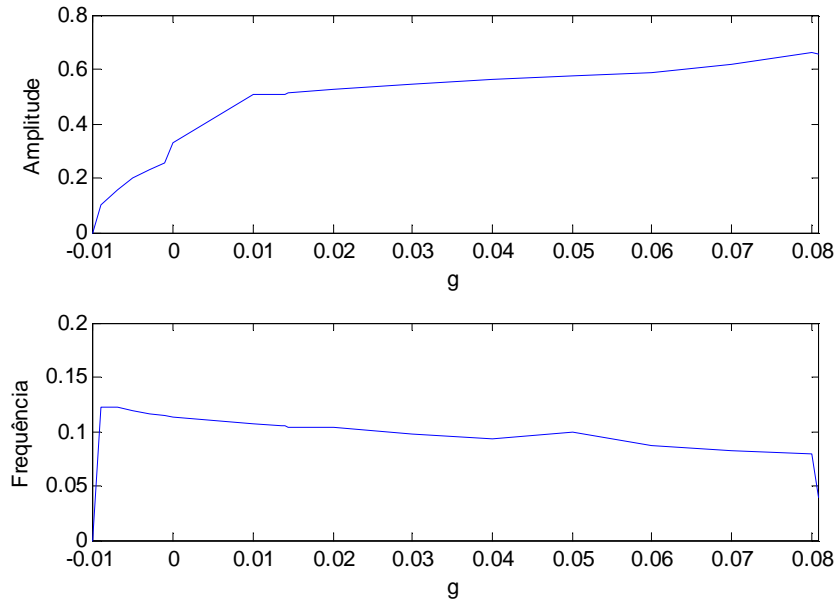
### 3.2.2. EQUAÇÕES DE MORRIS-LECAR

Nesta secção estuda-se o comportamento dinâmico da rede de 4 osciladores da Figura 1.a), considerando as equações de Morris-Lecar como modelo para a dinâmica da parte rítmica.

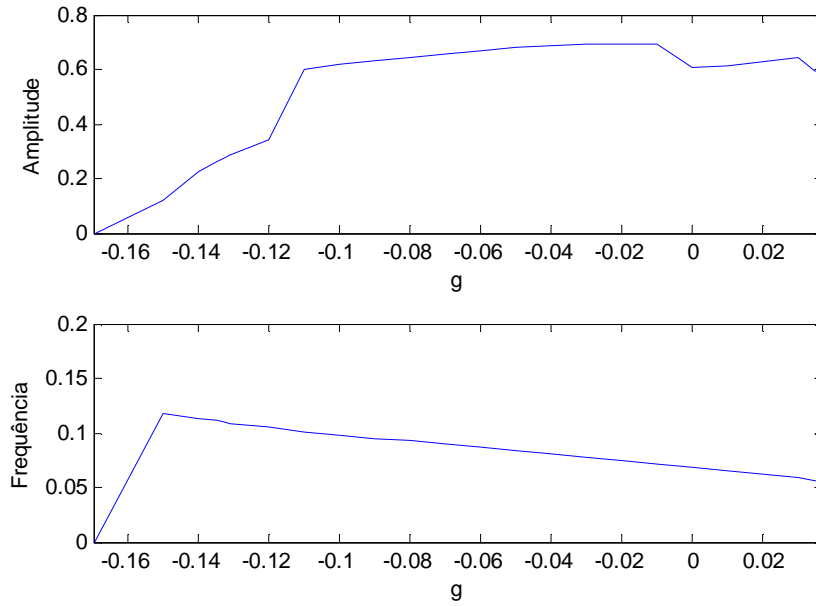
A inserção da parte discreta na parte rítmica faz-se para os casos (a.2) e (b). As equações do sistema discreto são as mesmas usadas nas secções anteriores, (7). Com a inclusão da parte discreta, o sistema de equações diferenciais ordinárias que modela a rede de osciladores da Figura 1.a) vem:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= -gCa \cdot fm_1 \cdot (x_i - 1) - g_l \cdot (x_i - v_l) - g_k \cdot z_i \cdot (x_i - v_k) + i + \sum_j k_{ij} z_j - y_i \\ \dot{y}_i &= \phi_i \cdot \tau_i \cdot (fn_i - z_i) - y_i\end{aligned}\quad (10)$$

Variou-se o parâmetro  $g$  e estudou-se a variação da amplitude e da frequência das soluções do sistema (4). Obtiveram-se os seguintes resultados para o *trot* (Figura 26) e para o *pace* (Figura 27).

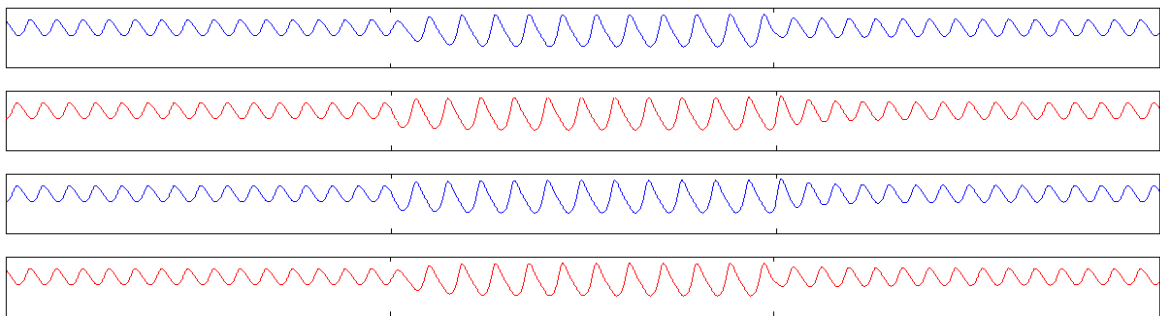


**Figura 26 Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *trot*, para variação de  $g$ , usando o sistema (10) (gráfico rescalado de  $[-5,5]$  para  $[-0.01;0.081]$ ).**



**Figura 27** Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *pace*, para variação de  $g$ , usando o sistema (10) (gráfico rescalado de  $[-5,5]$  para  $[-0.17;0.037]$ ).

Pela observação dos gráficos, conclui-se que, para  $g < -0.17$  os valores da amplitude e da frequência são nulos. Para  $-0.17 < g < 0.037$  a amplitude e a frequência crescem e de seguida decrescem. Para  $g > 0.037$ , a solução periódica do sistema bifurca para uma solução que não é identificada com nenhum passo locomotor dos quadrúpedes, logo, o valores da amplitudes e frequência não são calculados. Isto significa que existe um intervalo em que o parâmetro  $g$  deve variar. Neste caso será para  $g < 0.037$ .

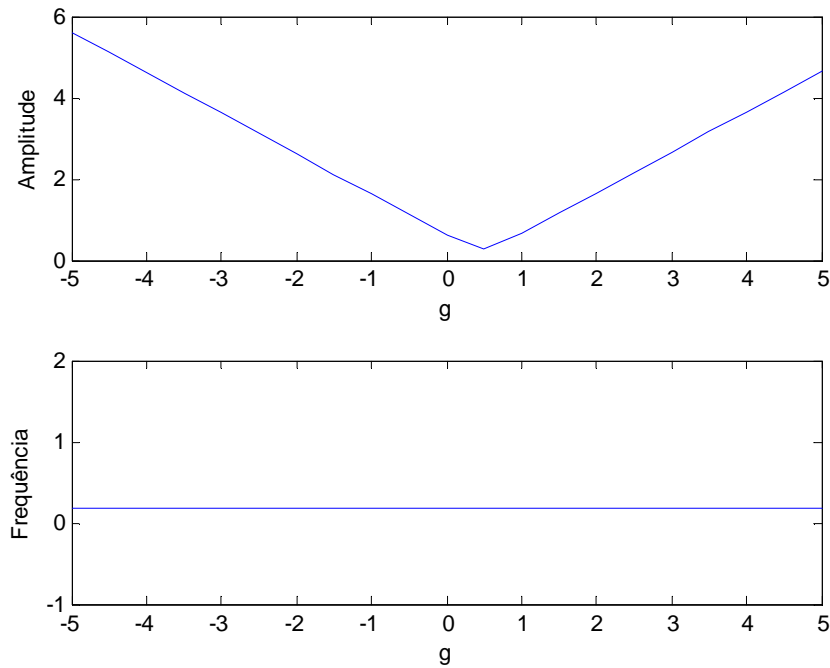


**Figura 28** Solução periódica identificada com o *trot*, com inclusão (a 1/3 da figura) e remoção da parte discreta (a 2/3 da figura) para  $g=1,0$ .

Como é possível verificar na Figura 28, com a inclusão da parte discreta o sistema torna-se mais lento (menor frequência) mas com uma maior amplitude, isto é, a extensão do movimento é maior, embora a velocidade diminua.

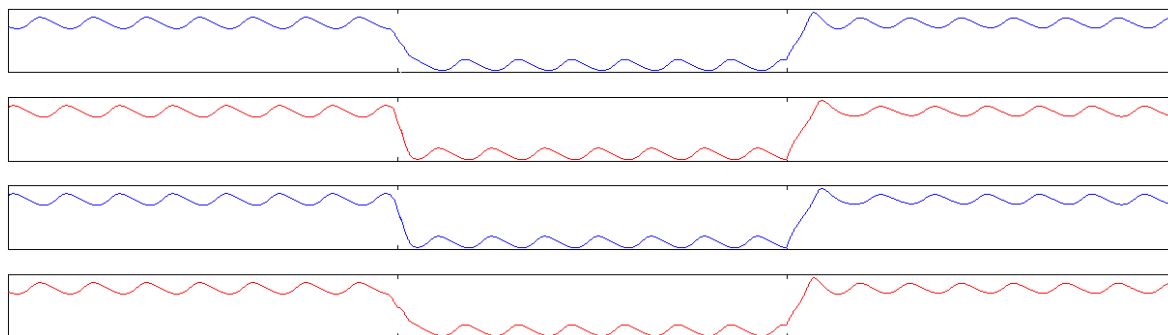
Simulou-se ainda a inclusão da parte discreta no caso (b), conforme Figura 17.b). Neste caso, as expressões da parte rítmica e discreta são iguais aos casos anteriores, (5) e (7), mas ao contrário destes, cada uma das componentes é calculada independentemente, sendo somadas exactamente antes de serem enviados os resultados para o robô.

Variou-se o parâmetro  $g$  e calcularam-se os valores das amplitudes e das frequências das soluções periódicas identificadas com o *trot*. Os resultados podem ser vistos na Figura 29.



**Figura 29 Amplitude e frequência da solução periódica identificada com o passo *trot*, para variação de  $g$ , segundo Figura 17.b)**

Como se pode verificar, a amplitude decresce para  $g < 0.5$  e cresce para  $g > 0.5$ . A frequência mantém-se constante para qualquer valor de  $g$ .



**Figura 30 Solução periódica identificada com o *trot*, para inclusão (a 1/3 da figura) e remoção (a 2/3 da figura) da parte discreta para  $g=1,0$ .**

Observa-se que a inclusão da parte discreta traduz-se num deslocamento do sinal e, apesar de não ser visível, existe um aumento da amplitude. A frequência mantém-se constante.

A inclusão da parte discreta na parte rítmica traduz-se na alteração do *offset* do sistema, podendo levar a uma alteração da amplitude ou da frequência ou das duas quantidades, das soluções periódicas identificadas com passos locomotores quadrúpedes.

Pode concluir-se que a melhor forma de inserção da parte discreta que menos perturbação insere no robô é a inserção como offset, e que a inserção da parte discreta parece ser independente do sistema de equações diferenciais ordinárias que modelam a dinâmica interna de cada célula.

### 3.3. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Para melhor se compreender o sentido prático do estudo realizado ao longo deste trabalho, implementaram-se as equações utilizadas neste estudo. Primeiramente simulou-se numa plataforma informática, Webots™, e de seguida implementou-se num robô real, Aibo da Sony™, ambas as plataformas disponibilizadas pelo Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho.

#### 3.3.1. SIMULAÇÃO WEBOTS™



O Webots™ é um software profissional para simulação de trajectórias de robôs móveis. Este permite a criação de um ambiente 3D onde o utilizador poderá seleccionar um entre uma grande variedade de robôs, testando-o com as propriedades físicas reais, forma, massa, coeficiente de atrito. O utilizador poderá ainda adicionar diversos sensores e actuadores, de forma que a simulação se assemelhe a uma situação real. Por último, quando o robô simulado se comportar como o esperado, o programa pode ser transferido para um robô real [38].

Simulou-se então o robô Aibo baseado nas expressões utilizadas neste trabalho. Foi realizado um vídeo, de onde se pôde retirar a Figura 31.



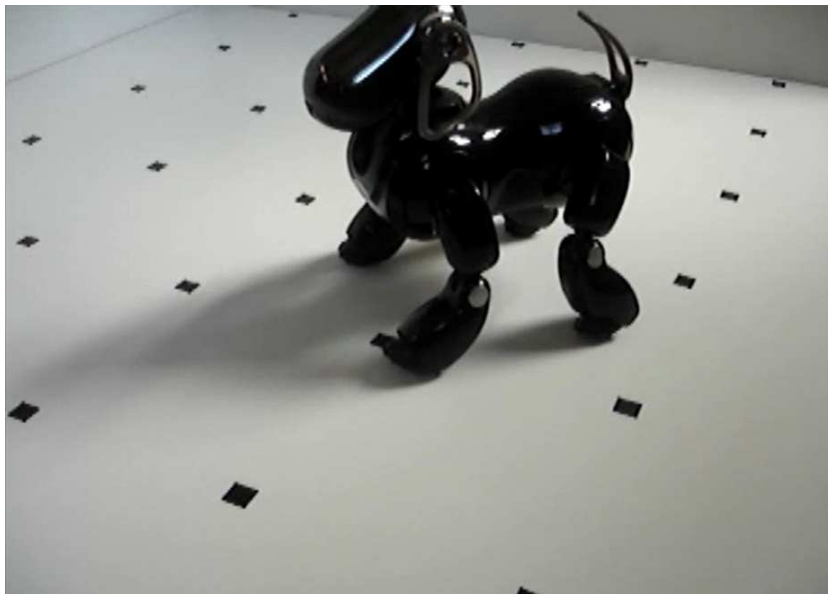
**Figura 31** Imagem retirada do vídeo do Webots™ (*walk*)

Por uma questão relacionada com as propriedades físicas e mecânicas do robô, optou-se por simular o passo locomotor *walk*.

### **3.3.2. IMPLEMENTAÇÃO REAL**

O Aibo é um dos robôs baseados em animais de estimação produzidos pela empresa Japonesa Sony™. Este é um robô capaz de andar, ver e “amadurecer” graças às câmaras e aos diversos sensores que possui. O Aibo foi introduzido em 1999 e descontinuado em 2006 [34].

Tal como no Webots™, foram implementadas no robô equações baseadas neste estudo. Mais uma vez foi elaborado um vídeo, do qual se retirou a Figura 32.



**Figura 32** Imagem retirada do vídeo da implementação real no Aibo (*walk*)

## 4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste trabalho estudam-se modelos de geradores centrais de padrões de locomoção para gerar trajectórias em tempo real de robôs quadrúpedes. As trajectórias subdividem-se em parte rítmica e parte discreta. A parte rítmica é gerada por um gerador central de padrões de locomoção. Estes CPGs são constituídos por 4 células acopladas. Cada célula e a parte discreta é modelada por um sistema de equações diferenciais ordinárias não lineares, inspirado no modelo VITE. Consideram-se o oscilador de Hopf e as equações de Morris-Lecar como dinâmica interna de cada célula que constitui os modelos de CPGs da Figura 1.

Simulam-se numericamente os modelos, usando ou o oscilador de Hopf para modelar a parte rítmica ou as equações de Morris-Lecar. Medem-se a amplitude e a frequência de dois passos locomotores quadrúpedes para variação do parâmetro  $g$  no intervalo  $[-5;5]$ . Consideram-se duas formas distintas de incluir a parte discreta na parte rítmica: (a) como um (a.1) *offset* ou (a.2) somada nas expressões que modelam a parte rítmica, e (b) somada ao sinal da parte rítmica antes de ser enviado às articulações do robô. No caso (a.1), considerando o oscilador de Hopf como dinâmica interna das células, verifica-se que a

amplitude e a frequência se mantêm constantes para  $-5 < g < 5$ . No (a.2), usando novamente o oscilador de Hopf, a amplitude e a frequência têm o mesmo comportamento, crescendo e diminuindo nos intervalos de  $g$   $[-0.5, 0.34]$  e  $[0.4, 1.83]$ , sendo nos restantes valores de  $g$  nulas. Isto traduz-se em variações na extensão do movimento e na velocidade do robô, proporcionais à amplitude e à frequência, respectivamente. Ainda com o oscilador Hopf, no caso (b), a frequência mantém-se constante enquanto a amplitude diminui para  $g < 0.2$  e aumenta para  $g > 0.2$ . A extensão do movimento varia de forma directamente proporcional à amplitude. No caso das equações de Morris-Lecar, quando a componente discreta é embebida (a.2), a amplitude e a frequência aumentam e depois diminuem para  $-0.17 < g < 0.037$ . Quando se somam as duas componentes, mais uma vez a frequência mantém-se constante enquanto a amplitude diminui para  $g < 0.5$  e aumenta para  $g > 0.5$ .

Após a comparação dos diferentes resultados, pode concluir-se que a melhor forma de inserção da parte discreta que menos perturbação insere no robô é a inserção como offset, e que a inserção da parte discreta parece ser independente do sistema de equações diferenciais ordinárias que modelam a dinâmica interna de cada célula.

Como trabalho futuro, é importante prosseguir o estudo das diferentes formas de inserção da parte discreta na parte rítmica do movimento, para que se possa gerar uma locomoção quadrúpede, robusta, flexível, com objectivos, em terrenos irregulares, modelada por correcções discretas aos padrões rítmicos.

## Referências Documentais

- [1] *Adaptive Materials powers military robot*, Fuel Cells Bulletin, vol. 2008, Issue 11, pp. 3, 2008.
- [2] Aoi, S., Tsuchiya, K. *Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators*, Autonomous Robots, vol. 19, pp. 219-232, 2005.
- [3] Barai, R., K. Nonami, K. *Optimal two-degree-of-freedom fuzzy control for locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot*. Information Sciences, vol. 177, Issue 8, pp. 1892-1915, 2007.
- [4] Byl, K. *Metastable Legged-Robot Locomotion*, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [5] Collins, J. J., Stewart, I. N. *Coupled Nonlinear Oscillators and the Symmetries of Animal Gaits*, Journal Nonlinear Science, vol. 3, pp. 349-392, 1993.
- [6] Degallier, S., Righetti, L., Natale, L., Nori, F., Metta, G., Ijspeert, A. *A modular bio-inspired architecture for movement generation for the infant-like robot iCub*. Proceedings of the second IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2008.
- [7] Degallier, S., Santos, C. P., Righetti, L., Ijspeert, A. *Movement generation using dynamical systems: a humanoid robot performing a drumming task*. Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOID06), 2006.
- [8] Espenschied, K. S., Quinn, R. D., Beer, R. D., Chiel, H. J. *Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 18, Issues 1-2, pp. 59-64. 1996.
- [9] Flann, N. S., Moore, K. L., Ma, L. *A small mobile robot for security and inspection operations*, Control Engineering Practice, vol. 10, Issue 11, pp. 1265-1270, 2002.
- [10] Gambaryan P. *How Mammals Run: Anatomical Adaptations*. John Wiley & Sons, Inc. New York., 1974.
- [11] Golubitsky, M., Stewart, I. *The symmetry perspective*. Progress in Mathematics 200, Birkhauser, Basel, 2002.
- [12] Golubitsky, M., Stewart, I., Buono, P.L., Collins, J.J. *A modular network for legged locomotion*. Physica D vol. 115, pp. 56-72. 1998.
- [13] Golubitsky, M., Stewart, I., Buono, P.L., Collins, J. J. *Symmetry in locomotor central pattern generators and animal gaits*. Nature, vol.401, pp. 693-695. 1999.
- [14] Grillner, S., Wallén, P., Saitoh, K., Kozlov, A., Robertson, B. *Neural bases of goal-directed locomotion in vertebrates-an overview*. Brain Research Reviews, vol. 57, pp. 2-12, 2007.
- [15] Haddad, M., Chettibi, T., Hanchi, S., Lehtihet, H. E. *A random-profile approach for trajectory planning of wheeled mobile robots*, European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 26, pp. 519-540, 2007

- [16] Hellgren, J., Grillner, S., & Lansner, A. *Computer simulation of the segmental neural network generating locomotion in lamprey by using populations of network interneurons*. Biological Cybernetics, vol. 68, pp. 1-13, 1992.
- [17] Hodgkin A. L., Huxley, A. F., *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve*, Journal of Physiology, vol. 117, pp. 500–544, 1952. Reproduced in Bulletin of Mathematical Biology, vol. 52, pp. 25–71, 1990.
- [18] Hoyt, D.E., Taylor, R.C. *Gait and the energetic of locomotion in horses*. Nature, vol. 292, pp. 239-240, 1981.
- [19] Hwang, K., Dongmok, K., Hojoon, Y., Kyouhee, L., Kunchan, S., Doyoung, C., Jongwon, K. *A wall climbing robot with vacuum caterpillar wheel system operated by mechanical valve*, Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots pp. 28-3. 2006.
- [20] Ijspeert, A. J. *A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander*. Biological Cybernetics, vol. 84(5), pp. 331-348. 2001.
- [21] Ijspeert, A J. *Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review*. Preprint of Neural Networks, vol. 21/4 pp. 642-653, 2008.
- [22] Ijspeert, A. J., Crespi, A., Ryczko, D., & Cabelguen, J. M. *From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model*. Science, vol. 315(5817), pp. 1416 – 1420, 2007.
- [23] Matsuoka, K., *Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators*. Biological Cybernetics, vol. 56, pp. 345-353, 1987.
- [24] Matsuoka, k., *Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation*. Biological Cybernetics, vol. 52, pp. 367-376, 1985.
- [25] McN , A. R., *Optimization of gaits in the locomotion of vertebrates*. Physiol. Vol. 69, pp. 1199-1227, 1989.
- [26] McN, A. R., *The gaits of bipedal and quadrupedal animals*. Journal of Robotics Research, vol. 3, pp. 49-59, 1994.
- [27] Morris, C., Lecar, H. *Voltage Oscillations in the Barnacle Giant Muscle Fiber*. Biophysical Journal, vol. 35, pp. 193-213, 1981.
- [28] Nandi, G.C., Ijspeert., Chakraborty, P., Nandi, A. *Development of Adaptive Modular Active Leg (AMAL) using bipedal robotics technology*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 57 pp. 603–616. 2009.
- [29] Oliveira, M., Santos, C. P., Ferreira, M. *Simulated visually-guided paw placement during quadruped locomotion*. Proceedings of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 2009.
- [30] Pinto, C.M.A. *Coupled Oscillators*. (PhD Thesis), University of Porto, 2004.
- [31] Pinto, C. M. A., Golubitsky, M. *Central Pattern Generators for Bipedal Locomotion*. Journal of Mathematical Biology, vol. 53, pp. 474-489, 2006.

- [32] Qiang, Z., Zengbo L., Yao, C. *A Back-stepping Based Trajectory Tracking Controller for a Non-chained Nonholonomic Spherical Robot*, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 21, Issue 5, pp. 472-480, 2008.
- [33] Righetti, L., Ijspeert, A. *Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 819-824, 2008.
- [34] Robot Aibo, <http://www.sonyaibo.net>.
- [35] Smith, S. G. *Pharmacy robots in UK hospitals: the benefits and implementation issues*, The Pharmaceutical Journal, vol. 280, pp. 599-602, 2008.
- [36] Schoner, G., Jiang, W. Y., Kelso, J. A. S. *A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions*. Journal of Theoretical Biology, vol. 42, pp. 359-391. 1990
- [37] Stoy, K., Shen, W. M., Will, P. M. *A simple approach to the control of locomotion in self-reconfigurable robots*. Robotics and Autonomous Systems vol. 44, pp. 191–199, 2003.
- [38] Webots™, Version: 6, <http://www.cyberbotics.com>.
- [39] Williams, T. L. *Phase coupling by synaptic spread in chains of coupled neuronal oscillators*. Science, vol. 258, pp. 662-665, 1992.
- [40] Williams, T. L. *Phase coupling in simulated chains of coupled neuronal oscillators representing the lamprey spinal cord*. Neural Computation, vol. 4, pp. 546-558, 1992.
- [41] Williams, T.L., Sigvardt, K.A., Kopell, N., Ermentrout, G.B., Remler, M.P. *Forcing of coupled nonlinear oscillators: studies of intersegmental coordination in the lamprey locomotor central pattern generator*, J. Neurophysiology, vol. 64, pp. 862–871, 1990.
- [42] Wojtara, T., Nonami, K., Shao, H., Yuasa, R., Amano, S., Waterman, D., Nobumoto, Y. *Hydraulic master–slave land mine clearance robot hand controlled by pulse modulation*, Mechatronics, vol. 15, Issue 5, pp. 589-609, 2005.
- [43] Wu, C. S., Liu, D.J., Wu, L. *An auto-programming system of MAG welding parameters for vision-based robot*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 13, Issue 4, pp. 291-296, 1994.
- [44] Yoshimitsu, K., Tanaka, T., Ohnuma, K., Miyawaki, F., Hashimoto, D., Masamune, K., *Prototype development of scrub nurse robot for laparoscopic surgery*. International Congress Series 1281, 845– 850, 2005.